

偏光技術を活用した電子ディスプレイの光利用効率の向上と視野角制御に関する研究

著者	足立 昌哉
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第19245号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00130487

令和元年度博士学位論文

偏光技術を活用した電子ディスプレイの
光利用効率の向上と視野角制御に関する研究

Study on Optical-Efficiency Improvement and Viewing-Angle Control of
Electronic Displays Utilizing Light Polarizing Technologies

東北大学大学院 工学研究科
電子工学専攻

足立 昌哉

Study on Optical-Efficiency Improvement and Viewing-Angle Control of Electronic Displays Utilizing Light Polarizing Technologies

ABSTRACT : With the progress in mobile communication technologies, accessing a large amount of information anywhere and anytime became a reality. In mobile devices, low power consumption is essential for electronic displays to prolong the operation time of batteries. Additionally, controlling the viewing angle of mobile devices is required to optimize privacy in public places and convenience that can be viewed by multiple people. Liquid crystal displays (LCDs) and organic light emitting diodes (OLED) displays are mainly used for electric displays in mobile devices. As for these electric displays, the image light is polarized light that can be relatively easily controlled by refraction, reflection, or birefringence, compared with random polarization. Therefore, by utilizing light polarizing technologies, this study aims at improving the optical efficiency of electronic displays to reduce power consumption and realize displays with controllable viewing angles.

In Chapter 1, the background and objectives of this study are described.

In Chapter 2, the types and definitions of polarized light are summarized along with the light polarizing technologies applied to achieve the study objectives.

In Chapter 3, the polarized backlight for optical efficiency improvement of LCDs is described. A typical LCD includes a pair of dye polarizers. A polarizer functions by absorbing a component of light and allowing the other component that has a plane orthogonal to the first component to pass through itself. Therefore, it absorbs at least 50% of the randomly polarized light illuminated onto the LCD panel. Hence, the ratio of the light from the backlight absorbed by the polarizer needs to be reduced to achieve low power consumption in LCDs. The light output at the interface of refraction contains more p-polarized light than s-polarized light owing to their transmittance difference at the refraction interface. We use interface refractions from existing optical components and maintain the state of polarization as light passes through them. Using this concept, we developed a polarized backlight utilizing a p-polarized light outcoupling. In our backlight, the luminance for the p-polarized light was improved by $\geq 30\%$, compared with that of a conventional backlight. Thus, low power consumption can be achieved applying the backlight to LCDs and this backlight can be composed of fewer components.

In Chapter 4, the reduction of power consumption of OLED displays by optical-efficiency improvement is described. At present, the luminous efficiency of blue OLED is the lowest among the three primary colors. Therefore, a polarized light-recycling structure has been proposed to improve the optical efficiency of the blue light. The proposed structure comprises a cholesteric liquid crystal (CLC), a quarter-wave plate, and a polarizer laminated

in the same order on the OLED. A quarter-wave plate and polarizer constitute the circular polarizer. The CLC has specific optical characteristics based on a helical molecular alignment. When randomly polarized light enters the CLC, the circularly polarized light component whose handedness corresponds to the sense of the cholesteric helix in a specific wavelength range is selectively reflected, and the circular components of the other handedness within the wavelength range and light outside of that range are transmitted. The wavelength of the selective reflection depends on the helical pitch of the CLC. In the proposed structure, the CLC with selective reflection in the wavelength range corresponding to a blue is used. Because the light emitted from the emitting layer is randomly polarized, the circularly polarized light corresponding to the wavelength range of the blue light is reflected selectively by the CLC, and the other components of light are transmitted through the CLC. The light transmitted through the CLC outside of selective reflection range is directed toward the viewer after its intensity decreases because of the absorption of the polarizer. In that case, the light transmitted through the CLC corresponds to the selective reflection range is circularly polarized light which is converted to the linearly polarized light by the quarter-wave plate and transmitted through the polarizer. In contrast, the light reflected at the CLC is directed to the OLED and reflected at the reflective electrode of the OLED and redirected toward the CLC. When light is reflected at the reflective electrode, the handedness of the circularly polarized light is reversed so that the light can be transmitted through the CLC and polarizer. Consequently, the blue light that is partially absorbed by the circular polarizer of the conventional structure can be recycled to increase the blue light output. By measuring of the active matrix OLED display prototype, the peak intensity of the blue light at 466 nm was increased by 56%, and the power consumption of the blue emission was reduced by 48%. This result proves that the proposed structure can reduce power consumption by improving optical-efficiency.

In Chapter 5, a viewing angle control device (VACD) applicable to the LCDs and OLED displays is described. A VACD can control the transmission of light at predetermined oblique angles without changing the transmission of the light in the normal direction. A VACD can be realized using a liquid crystal (LC) cell and a pair of polarizers. The LC cell enables the control of the polarization of light at predetermined angles by changing the voltage applied to the LC layer without varying the polarization of light in the normal direction. Therefore, the LC cell should have no phase change in the normal direction irrespective of the voltage applied to the LC. For this purpose, the alignment direction of the LC must be parallel or perpendicular to the absorption axis of the pair of polarizers. A conventional VACD uses a LC cell with homogeneous alignment which restricts light shielding to a small region at an oblique angle. In the proposed VACD, a wider range of viewing angles can be controlled. The

VACD involves a hybrid aligned nematic (HAN) LC cell and a negative C-plate. When a small voltage (0–3 V) is applied to the LC layer, the transmittance in the oblique direction decreases owing to the negative C-plate and LC alignment in the thickness direction; thus, the viewing angle becomes narrow. On the other hand, the viewing angle widens when a high voltage is applied to the LC layer since the transmission increases in the oblique direction by compensating the phase difference between the negative C-plate and LC layer. Compared with that of the homogeneously aligned LC cell, the proposed VACD can control a wider region with a polar angle range ≥ 2.5 times and an azimuth angle range ≥ 3 times increased. By arranging the proposed VACD on top of the electronic display, the controllable viewing angle can be realized.

In Chapter 6, a summary of this study and its future potential are provided.

目次

第1章 緒言	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 電子ディスプレイの役割と発展の経緯	1
1.2.1 電子ディスプレイの役割.....	1
1.2.2 液晶ディスプレイの発展.....	3
1.2.3 有機 EL ディスプレイの発展.....	8
1.3 移動通信システムの進化と電子ディスプレイへの期待.....	12
1.4 本研究の目的	14
1.5 論文の構成.....	15
参考文献.....	17
第2章 偏光制御技術の分類と適応性.....	19
2.1 はじめに.....	19
2.2 偏光の種類と定義	19
2.3 偏光制御技術の分類.....	25
2.3.1 偏光の抽出	25
2.3.2 偏光状態の変更	30
2.3.3 偏光制御技術の分類.....	33
2.4 電子ディスプレイへの要求と適用する偏光制御技術	34
参考文献.....	37
第3章 液晶ディスプレイの光利用効率の向上 ¹⁾	38
3.1 はじめに.....	38
3.2 液晶ディスプレイの低電力化に向けた課題.....	40
3.3 新しいバックライトの構成と評価方法.....	42
3.3.1 新しいバックライトの基本構成.....	42
3.3.2 評価方法と偏光度の定義.....	44
3.4 偏光バックライトの構造	46
3.4.1 p 偏光有効利用のコンセプト	46
3.4.2 プリズムシートの構造	47

3.4.3 指向性拡散シートの構造	51
3.5 評価結果	52
3.5.1 プリズムシート通過時の特性	52
3.5.2 バックライトの性能	55
3.5.3 他方式との比較	58
3.6 性能改善の検討	59
3.6.1 改良の余地について	59
3.6.2 プリズムシートの基材の改良	60
3.7 まとめ	65
参考文献	66
第4章 有機 EL ディスプレイの光利用効率の向上	67
4.1 はじめに	67
4.2 有機 EL ディスプレイの低電力化に向けた課題	69
4.2.1 有機 EL 素子の発光原理と効率	69
4.2.2 外光反射抑制技術と光利用効率の低下	70
4.3 光リサイクル構造による青色光の光利用効率向上	72
4.3.1 コレステリック液晶の選択反射を用いた光リサイクル構造	72
4.3.2 光リサイクル構造の効果と課題	74
4.3.3 反射増大の原因と対策	77
4.3.4 光リサイクル構造を有する有機 EL ディスプレイの性能	83
4.4 まとめ	87
参考文献	88
第5章 視野角制御機能の開発	89
5.1 はじめに	89
5.2 視野角制御技術の分類	90
5.3 視野角制御素子の検討	92
5.3.1 視野角制御機能付きディスプレイの構造	92
5.3.2 シミュレーション及び実験方法	94
5.4 視野角制御素子の検討結果	97
5.4.1 平行配向素子の検討	97

5. 4. 2 ハイブリッド配向素子の検討.....	103
5. 4. 3 評価結果.....	109
5. 5 まとめ.....	113
参考文献.....	114
第 6 章 総括	116
本研究に関する業績	120
謝辞.....	123

第1章 緒言

1.1 はじめに

電子ディスプレイは電気信号を画像に変換して出力表示する装置である。長期に渡りブラウン管（陰極線管）がテレビやモニター等の電子ディスプレイとしてその役割を担っていた。1980年代になると薄型で軽量のフラットパネルディスプレイが登場し、ブラウン管では実現が不可能なノートパソコンやスマートフォンなどの新たなアプリケーションの誕生を牽引した。また、大画面化してもフットプリントが大きく増えないことから、一般家庭への大画面テレビの普及を促進した。フラットパネルディスプレイとしては、液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイ、有機 EL (Electro-Luminescence) ディスプレイ、フィールドエミッションディスプレイ、電気泳動ディスプレイなど様々な方式が提案されている。この中で特に液晶ディスプレイと有機 EL ディスプレイは電子ディスプレイの用途と市場の拡大を牽引し、現在、主流の方式となっている。

一方、アナログ方式から始まった移動通信システムはおよそ10年毎に世代の進化が進み、現在、第5世代移動通信システム(5G)が立ち上がりつつある。この様な移動通信システムの進歩に伴い、スマートフォンなどのモバイル機器を通じて、いつでもどこでもデジタル化された画像情報を取得可能な社会環境が実現している。このため、人とモバイル機器を通じた画像情報とのインターフェースとしての電子ディスプレイの重要性は、今後、さらに高まると考えられる。そこで、現在、モバイル機器の電子ディスプレイとして主流となっている液晶ディスプレイと有機 EL ディスプレイについて、その発展の経緯を振り返り、今後、要求される機能について検討した。

1.2 電子ディスプレイの役割と発展の経緯

1.2.1 電子ディスプレイの役割

人が得る情報の8割から9割は視覚からといわれているが、モダリティの異なる感覚を一つの次元で比較可能なかどうかを含めて、その科学的根拠を示す出典は明確ではない¹⁾。しかし、1972年に出版された『産業教育機器システム便覧』²⁾をはじめ、五感の中で視覚の影響が最も大きいとする報告は多い³⁾⁴⁾。このため、人に対して視覚情報を提供する電子ディスプレイは人と機械システムとの接点となるヒューマンインターフェースとして極めて重要な役割を担うものと考えられる。特に液晶ディスプレイや有機 EL ディスプレイなどのフラットパネルディスプレイは、大画面化しても場所を取らないことから、一般家庭への大画面テレビの普及や、低電力で持ち運びが容易なことからノートパソコン、スマートフォン、タブレット端末など新たなモバイル機器の実現を牽引した(図1-1 参照)。ま

た、自動車ではカーナビゲーションなどの地図情報や車両情報などを表示するためフラットパネルディスプレイの搭載数が増えている。このように情報インフラに支えられた社会において、生活のあらゆるシーンに溶け込み、いつでもどこでも情報を人々に伝え、人々を結びつけることができる電子ディスプレイは今や無くてはならないものである。

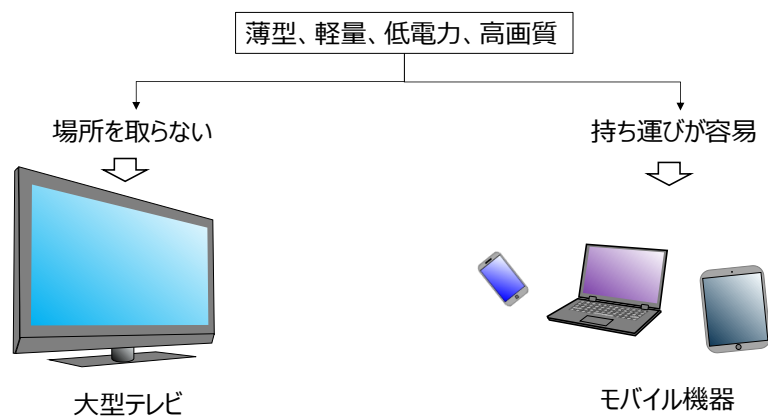


図 1-1 フラットパネルディスプレイが牽引した新たなアプリケーション

1. 2. 2 液晶ディスプレイの発展

液晶は 19 世紀後半に欧州で発見された。ドイツの植物学者フリードリヒ・ライニツァーが純粋な物質が二つの融点をもつという不可解な観察をしたことがその端緒である。この結果を伝えられた物理学者オットー・レーマンがこの物理現象が結晶に由来していると誤認し、それに Liquid crystal (液体結晶＝液晶)という名称を与えた⁵⁾。

液晶の発見から 80 年近く経った 1968 年に米国の RCA 社が液晶による電子ディスプレイの実現を提唱し、一気にその関心が高まった⁶⁾。この当時、電子機器によって処理された情報を人に伝えるためのインターフェースが必要とされる時代になっており、液晶による表示素子の実現にとって重要な2つの液晶表示モードが相次いで提案された。一つは RCA 社が発表した液晶表示モードで、電流を必要とする動的散乱モード (Dynamic Scattering Mode : DMS)⁷⁾、もう一つは電界効果のみで動作するねじれネマチック液晶⁸⁾である。

図1-2 に示すとおり、動的散乱モードは、一方に透明電極、他方に反射電極を成膜した 2 枚のガラス基板 (透明基板) により液晶層を挟持したもので、負の誘電率異方性を有するネマチック液晶 (分子長軸の方向が揃った液晶) を基板に対し垂直に配向したものである。液晶層に電圧を印加しない場合、光は反射電極で鏡面反射する。一方、液晶層に電圧を印加すると電界方向と直交する方向に分子長軸を揃えようとする液晶分子と、イオンの移動方向に分子長軸を揃えようとする液晶分子とが混在する状態になる。つまり、屈折率の異方性を有する液晶分子がランダムに並ぶため、液晶層に入射した光は散乱し、白く見えるようになる。このため鏡面反射状態を暗、散乱反射状態を明とする反射型の表示が実現する。

ねじれネマチック液晶は、透明基板上に成膜された透明電極の上に配向処理を施すことで上下の基板間で液晶分子が連続的に 90 度ねじれるように構成される。2 枚の透明基板の外側にはそれぞれ偏光板をその光学軸 (吸収軸もしくは透過軸) が近接する液晶の配向方向と平行となるように配置する。電圧を印加しない時、偏光板を通過し、液晶層に入射する直線偏光は、その偏光面が液晶分子のねじれに沿って向きを変え、最終的に 90 度回転し、出射側の偏光板を透過して明表示となる。一方、十分な電圧を印加した時は正の誘電率異方性を有する液晶を用いることで、液晶分子が電界方向と平行な方向に向きを変え、ねじれが解消する。このため、入射した直線偏光の偏光面は変化せず (回転せず)、出射側の偏光板で吸収されて暗表示となる。

動的散乱モードは偏光板を用いないため明るい表示が可能だが、駆動電圧が 10V 以上と高く、コントラスト比は 20 程度である。一方、ねじれネマチック液晶は偏光板を用いるため自然光 (ランダム偏光) の約半分が吸収されて利用できないが、動的散乱モードの 1/2～1/3 程度の低い電圧で、

より高いコントラスト比を得ることができる。なお、ねじれネマチック液晶は観察する角度によって液晶分子の配列状態が異なるため、液晶による偏光状態の変化の仕方も観察する角度によって異なる。このため、観察する角度を変えると明るさや色が変化するので視野角は狭い。

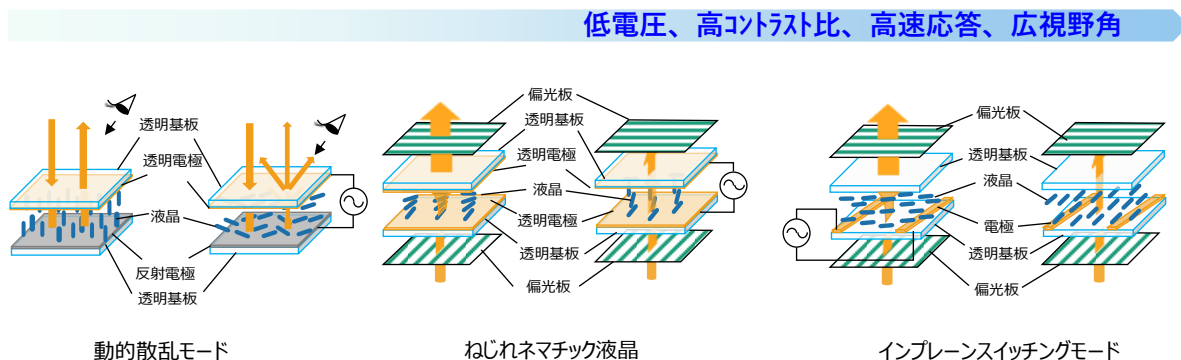


図1-2 液晶表示モードの変遷

液晶ディスプレイの視野角を広くする方法として、水平配向したネマチック液晶を基板と平行な方向の電界によって駆動するインプレーンスイッチングモード⁹⁾と、垂直配向した負の誘電率異方性を有するネマチック液晶を基板面に略垂直な方向の電界で駆動する垂直配向液晶¹⁰⁾が実用化されている。ねじれネマチック液晶や垂直配向液晶が液晶層を挟むように上下に電極を有するのに対し、インプレーンスイッチングモードでは図1-2に示すとおり、液晶層の片側に櫛歯状の電極を配置し、基板面と平行な方向に作用する電界で液晶分子を駆動する。この場合、理想的には液晶分子に垂直方向の傾きが発生しないため、観察する角度によって生じる明るさや色の変化が本質的に少ないという特長がある¹¹⁾¹²⁾。なお、インプレーンスイッチングモードでは透過率を向上するために、面状の透明電極上に透明な誘電体を介してスリット状の透明電極を配置し、フリンジ電界により液晶分子を駆動する構造¹³⁾が現在では主流となっている。また、高速表示を実現するために電極構造の工夫や液晶材料の最適化などが検討されている¹⁴⁾。このように液晶表示モードは低電力化に加え、高コントラスト化、広視野角化及び高速化等の高画質化に向けて発展してきた。

次に、図1-3に液晶ディスプレイの駆動方式の変遷を示す。液晶ディスプレイの駆動は、当初、独立したセグメント(切片)電極と共通の一樣電極により数字や文字記号を表現するセグメント方式が用いられた。しかし、セグメント方式では漢字などのより複雑な文字や図形が表現できないことから、画素を行方向と列方向に整列配置し、各画素の明暗の組み合わせで所望の画像を表現するドットマトリクス方式が登場した。ドットマトリクス方式にはパッシブマトリクス方式とアクティブマトリクス方

式がある。パッシブマトリクス方式は単純マトリクス方式とも呼ばれ、列の長手方向に伸びる信号電極(データ線とも呼ばれる)と、行の長手方向に伸びる走査電極(アドレス線とも呼ばれる)が交差する部分が画素に成る。画像表示は以下のように行う。選択した走査電極には選択期間にそれ以外の期間と異なる電圧を印加する。このとき、全ての信号電極に、選択した走査電極一ライン分の画像情報に応じた電圧を印加する。すると、走査電極と信号電極が交差する部分、すなわち、選択した走査電極一ライン分の各画素に画像情報に応じた電位差が生じ、一ライン分の画像が表示される。選択する走査電極を順次切り替え、その都度、信号電極に選択した走査電極一ライン分の画像情報に応じた電圧を印加する。この動作を1画面(1フレーム)分行うことで画像が表示される。

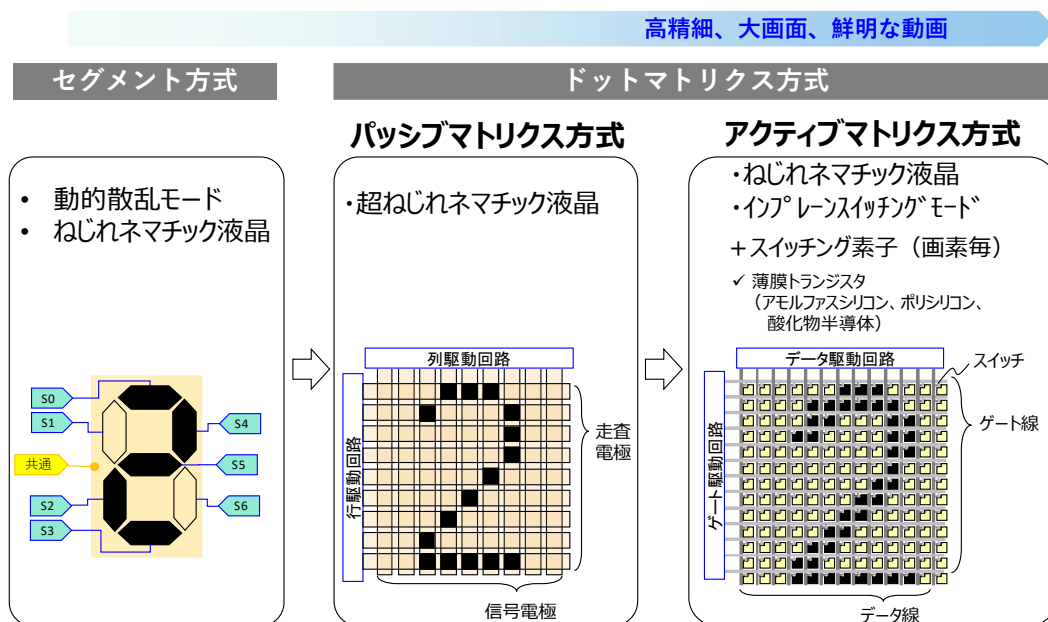


図1-3 液晶ディスプレイの駆動方式の変遷

このように、パッシブマトリクス方式では一度に表示できる範囲が1ライン分のみであり、次の行の走査電極が選択されると前の行の走査電極の表示は消す必要がある。このため、1フレームを表示する際、1ラインの表示に使える時間は1フレーム期間を走査電極数で割った限られた期間(時間)のみになる。限られた短い期間に対応する方法として超ねじれネマチック液晶が考案された。超ねじれネマチック液晶は通常のねじれネマチック液晶のねじれ角が 90° であるのに対し、 180° から 270° とより大きなねじれ角となるように製作される。超ねじれネマチック液晶では印加電圧の僅かな差によって液晶分子の配向状態が大きく変化するため、電圧と透過率の関係がより急峻になる。このため、走査電極が数百本を超えるパッシブマトリクス液晶ディスプレイでは超ねじれネマチック

ク液晶が採用された。

パッシブマトリクス方式は、走査電極を増やすと1フレーム期間に1ラインに割り当てられる時間が短くなる。静止画であれば、1フレーム期間において1ラインに割り当てられる時間が短くなっても、複数のフレーム期間で繰り返し同じ画像情報を入力することで、時間を稼ぐことができる。しかし、動画の場合は、1フレーム期間毎に所定の画像を表示する必要があるため、1ラインに割り当てられる時間が短くなると正確な表示を行うことが難しくなる。このため、パッシブマトリクス方式は大画面化や高精細化のために走査電極を増やすことに限界がある。

そこで登場したのがアクティブマトリクス方式である。アクティブマトリクス方式では、データ駆動回路と接続されたデータ線と、ゲート駆動回路に接続されたゲート線が交差する位置に画素を形成する。画素は、ゲート線とデータ線に接続されたスイッチと、スイッチと接続された画素電極及び蓄積容量と共通電極から構成され、画像情報に応じた電圧を各画素の液晶層に印加すると、その電荷は蓄積容量に一定時間保持される。このため、各画素は1フレーム期間の間、同じ情報を表示し続けることができるようになるので大画面化や高精細化が可能になり、動画の表示はより鮮明になる。アクティブマトリクス方式は高精細ディスプレイや大画面ディスプレイにおいて、より高品質な画像表示を実現できるため、これらの分野で主流となっている。

なお、画素のスイッチ(スイッチング素子)には薄膜トランジスタが用いられ、その半導体としてはアモルファスシリコン、ポリシリコンまたは酸化物半導体が採用されている。ポリシリコンには耐熱性の高い石英ガラス基板上で1000℃程度の高温工程で作られる高温ポリシリコンと無アルカリガラス基板でも耐えられる600℃以下の温度で作られる低温ポリシリコンがある。ポリシリコンは、アモルファスシリコンの電子移動度が $0.5\sim 1.0\text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度であるのに対し、2桁高い $300\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上にすることができる。このため、ポリシリコンを用いると画素のスイッチをより小さくすることが可能となり、画素密度が高く、より高精細な液晶ディスプレイを実現することができる。また、p型とn型でともに高いキャリア移動度が得られるため、スイッチだけでなく駆動回路にも適用されている¹⁵⁾。2000年代に入ると、酸化物半導体の薄膜トランジスタへの応用研究が積極的に行われるようになった。特にインジウム(In)、ガリウム(Ga)、亜鉛(Zn)の酸化物はディスプレイ用の薄膜トランジスタとして開発が進められた。酸化物半導体は電子移動度がアモルファスシリコンの20倍と大きく、ディスプレイの周辺駆動回路を形成することが可能である。また、薄膜トランジスタをオフにした時の電流リークがポリシリコンと比較して1/10000以下、アモルファスシリコンと比較しても1/1000以下と低いという特長がある。酸化物半導体はこの低リークという特長から、一度、画素に書き込んだデータを長時間保持することができるため、静止画であれば画像データの書き換え回数を少なくすることで液晶ディスプレイ

の駆動電力を $1/5 \sim 1/10$ に抑制することが可能である¹⁶⁾。

このように液晶ディスプレイは液晶表示モード、駆動方式及びスイッチング素子がそれぞれ進歩し、より低消費電力で高画質な電子ディスプレイとして発展してきた。図 1-4 に現状の液晶ディスプレイ(インプレーンスイッチングモード)の基本構成を示す。液晶ディスプレイはバックライトとバックライトから出射する光の透過光量を調整することで画像を形成する液晶パネルとから構成される。液晶パネルはスイッチング素子、配線、画素電極及び共通電極を備える透明基板と、カラーフィルターを備える透明基板と、これら 2 枚の透明基板の間に挟持された液晶層を備える。さらに 2 枚の透明基板の外側にそれぞれ偏光板を備え、バックライトから出射する光のうち、下側の偏光板を透過した直線偏光の状態を液晶層で制御して上側の偏光板を透過する光量を調整することで、画像を形成する。このため、液晶ディスプレイから出射される画像光は基本的に直線偏光となる。

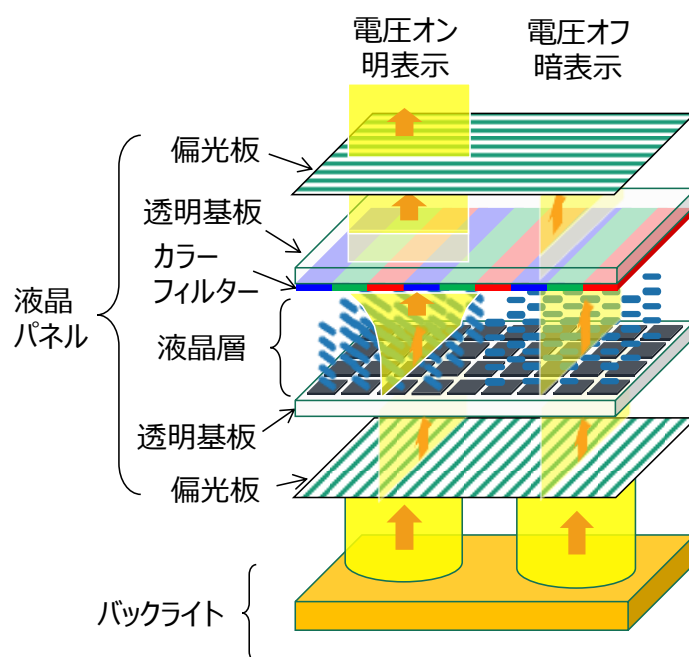


図 1-4 液晶ディスプレイの基本構成

1. 2. 3 有機 EL ディスプレイの発展

有機 EL ディスプレイは画素自体が発光し、その発光量を制御することで画像を表示する自発光型の電子ディスプレイである。画素の発光を担うのが有機電界発光素子である。有機電界発光素子の研究は 1960 年代には行われていたが、1987 年に発表されたキャリア特性の異なる 2 層の有機膜を積層した低電圧な発光素子(図 1-5)の報告¹⁷⁾以降、急激にその性能が向上した。なお、1987 年に発表された論文の題名が“Organic electroluminescent diodes”であったことが、日本で有機 EL (Electroluminescence)という名称が広く使われるきっかけになったといわれている¹⁸⁾。この際、提示された有機電界発光素子(有機 EL 素子)は、芳香族ジアミン(Diamine)が正孔輸送層として機能し、トリス(8-ヒドロキシキノリン)アルミニウム(Tris(8-hydroxyquinoline) aluminium; Alq3)が電子輸送層及び発光層として機能して Diamine に近い領域で発光が生じる。

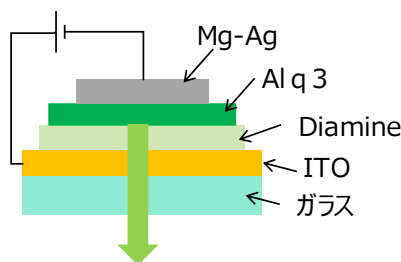


図1-5 有機 EL 素子の構造¹⁷⁾

図 1-6 は正孔輸送層、発光層及び電子輸送層に機能分離した 3 層構造の有機 EL 素子のエネルギーダイアグラムの模式図である¹⁹⁾。有機 EL 素子の陽極と陰極の間に直流電圧を印加すると電流が流れて、陽極からは正孔が注入され、正孔輸送層の電子が満ちた分子軌道(HOMO:最高占有分子軌道)を移動する。また、陰極からは電子が注入され、電子輸送層の空の分子軌道(LUMO:最低非占有分子軌道)を移動する¹⁹⁾。正孔、電子の両キャリアは発光層へ注入され、そこで再結合すると発光を生じる。この再結合が起こる領域は注入されたキャリアの密度と発光層のキャリア輸送性に依存する。

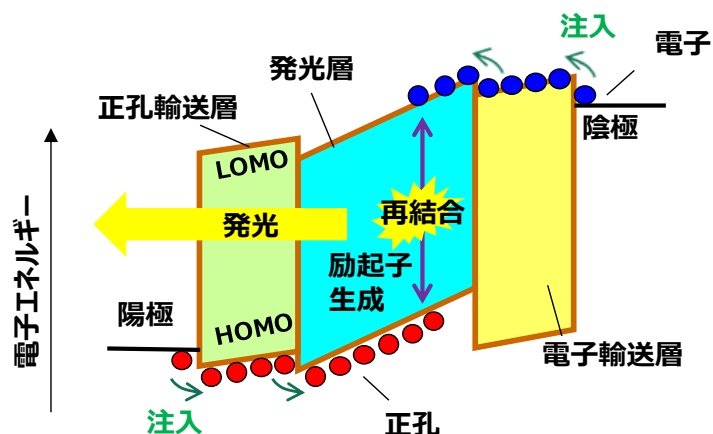


図 1-6 有機 EL 素子のエネルギーダイアグラムの模式図(3 層構造)

図 1-7 に発光の主な素過程を 3 種類示す。正孔と電子の再結合によって発光層を構成する有機分子は励起状態となる。その励起状態は電子スピンの向きが逆向きの一重項励起子と、電子スピンの同じ向きの三重項励起子に分かれ、その生成確率は 1:3 と見積もられている。三重項励起子が基底状態へ戻る過程は一般に非発光であり熱失活し、一重項励起子が発光に寄与する。一重項励起状態からの発光を蛍光と呼び、その発光材料は蛍光材料と呼ばれる。蛍光材料では仮に理想的な正孔と電子のバランスで 100%の再結合を実現した場合であっても、一重項励起子の生成確率から、内部量子効率 は 25%に留まる。なお、素過程の図は無いが、蛍光材料において三重項励起子の密度が高くなると衝突によって一重項励起子が生成される。この過程は三重項-三重項消滅 (Triplet-triplet annihilation) と呼ばれ、この過程が寄与することで発光効率が 50%程度向上したとの報告がある²⁰⁾。

発光効率を高めるため、生成確率の高い三重項励起子をより積極的に発光に利用するための検討が行われている。その一つが、発光材料として、その中心に重原子を有する金属錯体を用いて、禁制遷移である三重項励起状態からの発光(燐光発光)を得るという方法である²¹⁾。この様な発光材料は燐光材料と呼ばれ、特にイリジウム錯体などにおいては一重項励起子から三重項励起子への項間交差が生じることで、三重項励起子の生成効率が高くなり、100%に近い内部量子効率を実現している²²⁾。

一方、三重項励起状態と一重項励起状態とのエネルギーギャップを小さくし、三重項から一重項へのアップコンバージョン(逆項間交差)を可能とすることで、一重項励起状態から高効率な発光を得る熱活性化遅延蛍光²³⁾²⁴⁾が検討されている。熱活性化遅延蛍光材料は内部量子効率の理論限界が 100%であり、さらに通常、燐光材料に用いられる希少金属が不要で、分子設計の制約が少ないことから、今後の発展が期待されている。

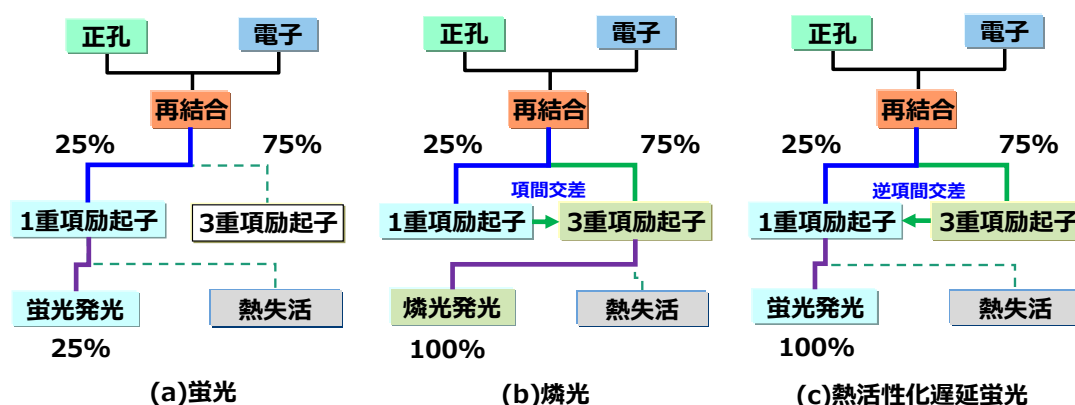


図 1-7 有機 EL 素子の発光の主な素過程

有機 EL ディスプレイの駆動は、図 1-3 に例示した液晶ディスプレイの駆動方式と同様、セグメント方式による数字などの簡易なパターン表示から、小型で比較的精細度が低い表示に対応するパッシブマトリクス方式を経て、高輝度、高精細、高コントラスト表示が可能で大画面化にも対応するアクティブマトリクス方式に発展してきた。図 1-8 に有機 EL ディスプレイの画素部の一部断面図を示す。有機 EL ディスプレイには有機 EL 素子(発光層)を形成した基板側から光を出射するボトムエミッション方式と、有機 EL 素子を形成した基板と反対側から光を出射するトップエミッション方式がある。セグメント方式やパッシブマトリクス方式においては、ボトムエミッション方式とトップエミッション方式とで光学的に本質的な違いは無い。また、ボトムエミッション方式は上部電極が不透明で良いので、成膜の際に有機膜へのダメージが比較的小さい金属膜の蒸着が適用できるため比較的作り易い。このため、当初、透明なガラス基板上に有機 EL 素子を形成するボトムエミッション方式が主流であった。しかし、アクティブマトリクス方式に対しては、画素回路や配線など光を遮るものが無く、より広い発光面積を確保できるトップエミッション方式が、高輝度化、低電力化及び長寿命化に有利である。このため、画素密度が高い中小型の高精細ディスプレイでは、トップエミッション方式が採用されている。特にポリイミドといった高耐熱な基板を用いるフレキシブルディスプレイでは、基板が無

色透明ではないためトップエミッション方式を採用する必然性が高い。

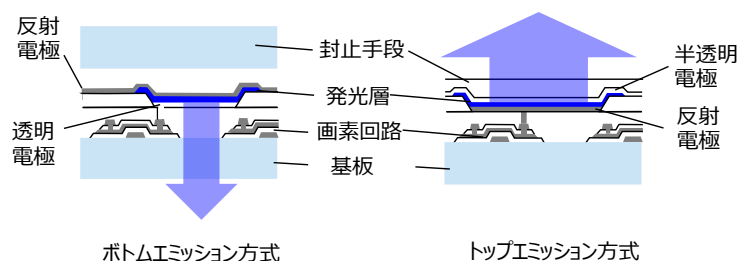


図 1-8 有機 EL ディスプレイの画素部の一部断面図

このように有機 EL ディスプレイは有機 EL 素子の発光効率の向上やトップエミッション方式の採用によって、より低消費電力で長寿命な電子ディスプレイに発展してきた。特にフレキシブル基板の適用が可能となることで、薄型・軽量に加え、フォルダブル(折りたたみ)やローラブルなど、これまでと違った使い方、用途を実現することが可能となる。図 1-9 に有機 EL ディスプレイの基本構成を示す。有機 EL ディスプレイは、画素回路を有する基板上に有機 EL 素子を備え、有機 EL 素子の発光、非発光を制御することで画像を形成する。このため、画像形成自体には偏光板を必要としない。しかし、有機 EL 素子は発光層の裏面に反射電極を備えることから、外光下での使用が想定される用途では外光反射を抑制するため、発光層の表面側に偏光板と1/4 波長板から成る円偏光板を備える。このため、モバイル機器用の有機 EL ディスプレイでは、液晶ディスプレイと同様、画像光は基本的に直線偏光となる。

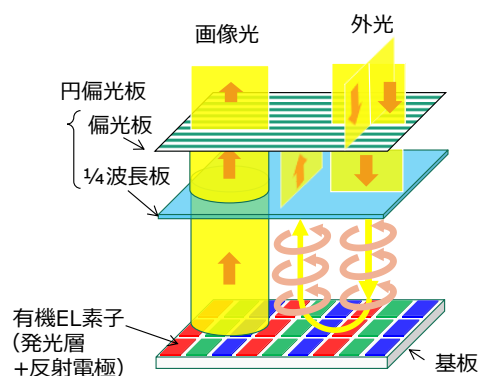


図 1-9 有機 EL ディスプレイの基本構成

1.3 移動通信システムの進化と電子ディスプレイへの期待

移動通信システムの進歩に伴いスマートフォンなどのモバイル機器を通じて、デジタル化された画像情報をいつでもどこでも取得可能な社会環境が実現している。図 1-10 に移動通信システムの進化を示す。アナログ方式から始まった移動通信システムは、およそ 10 年毎に世代の進化を進め、その最大通信速度は 30 年で約 10 万倍に達しつつある²⁵⁾。

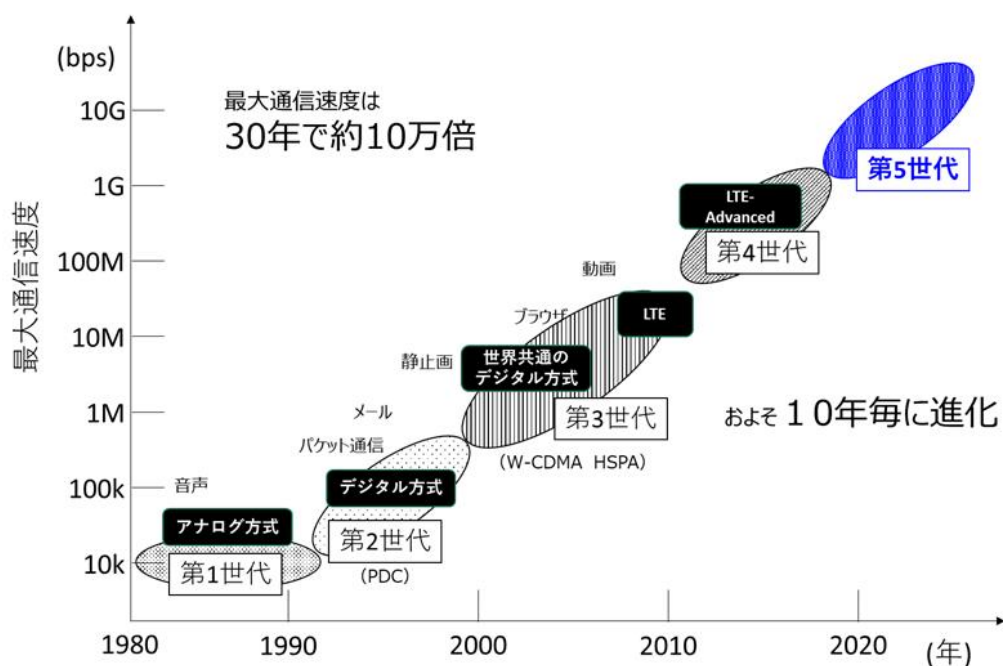


図 1-10 移動通信システムの進化²⁵⁾

第 5 世代移動通信システム(5G)では最高伝送速度が 10Gbps となり、第 4 世代の 100 倍速いブロードバンドサービスの提供が可能になる。この伝送速度は約 3 秒で 2 時間の映画をダウンロードできる速度であるため、高画質な画像データを大量にモバイル環境で利用することを可能にする。また、5G では多数同時接続が可能になる。具体的には接続機器数を 100 万台/K m²とすることが可能となり、建物の内部や自宅などで約 100 個のスマートフォン、タブレット、パーソナルコンピューターなどの端末や各種センサーを通信網に接続できるようになる。さらに 1 ミリ秒程度の超低遅延にできるため、通信による遅延を意識することなくリアルタイムにロボット等の精密機器を遠隔操作できるようになる。5G の普及が進み、いつでもどこでも大量の情報にアクセスすることができる社会が実現することで、人と情報とのインターフェースである電子ディスプレイの重要性は益々高まると考えられる。

このような状況の中、モバイル機器に搭載される電子ディスプレイへの期待として、以下の二つに着目した。一つ目は、電子ディスプレイのさらなる低消費電力化である。これは、高画質な動画や大量の情報をモバイル環境で利用できるようになると、モバイル機器を二次電池(バッテリー)駆動でより長時間利用することへの要求が高まると考えたからである。二つ目は、視野角の動的制御の実現である。いつでもどこでも個人情報や機密性の高い情報にアクセスし、閲覧することが可能になると、公共の場でプライバシーを守り、安全性を維持するために覗き見を抑制することが必要になる。一方、複数人で画像情報を観賞できる利便性も重要である。これらの条件を両立するため、図 1-11 に例示するとおり、覗き見を抑制する狭い視野角と複数人で画像情報を観賞できる広い視野角とを任意に切り替えることができる視野角の動的制御が必要になると考えた。



図1-11 視野角の動的制御

1.4 本研究の目的

本研究の目的は、超高速通信が利用できる環境において、モバイル機器に搭載される電子ディスプレイに期待される機能を実現することにある。図 1-12 にそのアプローチ方法を示す。本研究では、超高速通信環境においてモバイル機器に搭載される電子ディスプレイに要求される機能のうち、①モバイル機器の長時間使用のための低消費電力化と②公共の場でのプライバシー確保と利便性を両立する視野角の動的制御(視野角制御機能)の実現を目的とする。ここで、上述のとおり、モバイル機器に搭載される液晶ディスプレイと有機 EL ディスプレイはいずれも、光源から出射した光が最終的に偏光板を通過した後、画像光として出射する。つまり、本研究で対象とする電子ディスプレイはいずれも偏光を利用している。偏光は自然光(ランダム偏光)と比べると、比較的容易に制御することができる。例えば、屈折、反射、あるいは複屈折などの現象を用いることで、小さなエネルギー、もしくはエネルギーを使うことなく制御することが可能である。そこで、本研究では目的達成のために偏光及びその制御技術を積極的に活用することにした。①については、偏光板での吸収損失を抑制し、光利用効率を向上することでその実現を目指す。また、②については、画面の前面に配置して画像光の斜め方向の明るさのみを変調する視野角制御素子によってその実現を目指す。

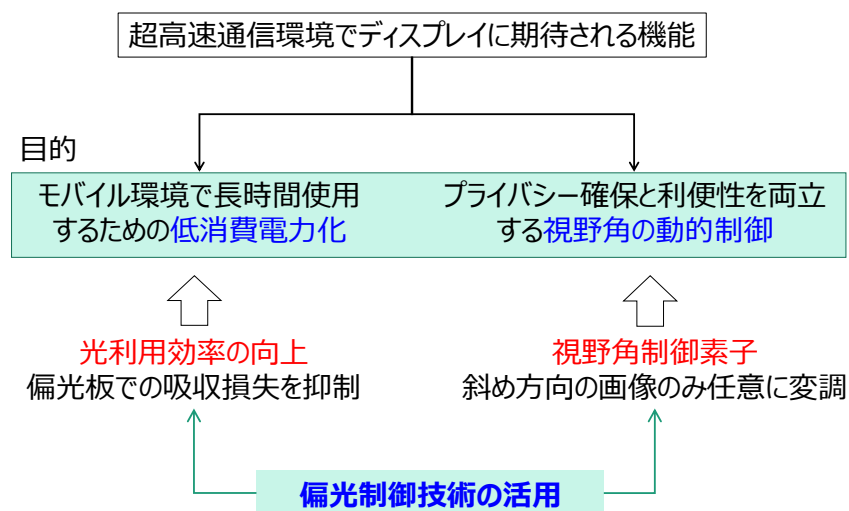


図 1-12 ディスプレイに期待される機能実現に向けたアプローチ方法

1.5 論文の構成

図 1-13 に本論文の構成を示す。

第 1 章では研究の背景として電子ディスプレイの役割と発展の経緯や移動通信システムの進化と電子ディスプレイへの期待を述べ、それに基づく本研究の目的が電子ディスプレイの低消費電力化と視野角の動的制御(視野角制御機能)の実現であることを説明する。

第 2 章では、偏光の種類と定義及びその制御技術について分類、整理し、電子ディスプレイへの適応性を議論する。さらに電子ディスプレイの低消費電力化と視野角制御機能の実現に適用する偏光制御技術について述べる。

第 3 章では、液晶ディスプレイの光利用効率向上による低消費電力化について述べる。具体的には構成部材の各界面における屈折の際に、フレネルの式から導き出されるとおり p 偏光の透過率が s 偏光よりも高くなることを積極的に利用して、特定の直線偏光をより多く出射するように構成したバックライト(偏光バックライト)について説明する。液晶ディスプレイは偏光バックライトを用いることで、液晶パネルの偏光板による吸収損失が抑制されて消費電力を低減できる。

第 4 章では、有機 EL ディスプレイの光利用効率向上による低消費電力化について述べる。特に三原色の中で有機 EL 素子の発光効率が低い青色に着目し、コレステリック液晶の選択反射を用いた光リサイクル構造による青色光の光利用効率の向上とそれに伴う消費電力の低減について説明する。また、コレステリック液晶を用いることによる副作用(外光反射の増加)とその対応策についても議論する。

第 5 章では視野角制御機能の開発について述べる。現在、モバイル機器に搭載されている液晶ディスプレイと有機 EL ディスプレイは共にその前面に偏光板を備える。このため、いずれのディスプレイも画像光は偏光である。本章ではこのことを利用し、画面上に配置するだけで機能する視野角制御素子について議論する。具体的には、液晶の複屈折性を利用した偏光制御技術により特定の斜め方向の透過光量のみを制御する視野角制御素子について述べる。特にハイブリッド配向したネマチック液晶とネガティブ C プレートとの組み合わせによって、より広い制御範囲を実現する方法について説明する。

第 6 章では本論文を総括し、本研究成果の将来への発展性について言及する。

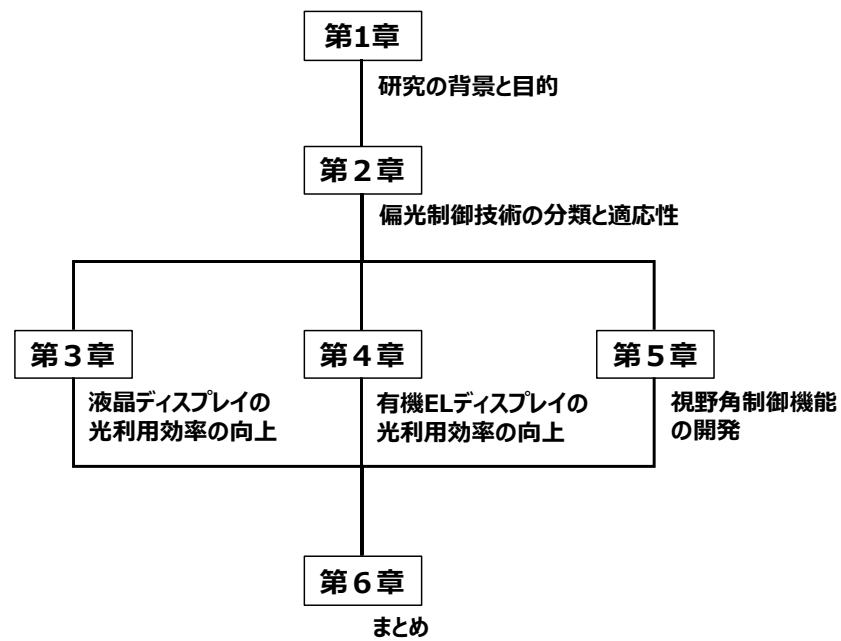


図 1-13 本論文の構成

参考文献

- 1) 加藤宏、「「視覚は人間の情報入力」の80%」説の来し方と行方」、筑波技術大学テクレポート、**25** (1)、95-100 (2017).
- 2) 教育機器編集委員会 委員長石川淳二編、「産業教育機器システム便覧」、第1版、日科技連出版社、(1972).
- 3) 山田雅弘、「各感覚における神経情報処理の共通点・相違点」、電総研調査報告、215、18-25 (1986).
- 4) 下条 誠、「皮膚感覚の情報処理」、計測と制御、**41**(10)、723-727 (2002).
- 5) デイヴィッド・ダンマー、ティム・スラッキン、(鳥山和久訳)、「液晶の歴史」、朝日新聞出版、(2011).
- 6) 武 宏、「液晶ディスプレイ発展の系統化調査」、技術の系統化調査報告共同研究編、8、(2015).
- 7) G. H. Heilmeier, L. A. Zanoni and L. A. Barton, “Dynamic Scattering: A New Electrooptic Effect in Certain Classes of Nematic Liquid Crystals”, Proc. IEEE **56**(7), 1163-1171 (1968).
- 8) M. Schadt and W. Helfrich, “Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal”, Appl. Phys. Lett. **18**(4), 127-128 (1971).
- 9) M. Oh-e and K. Kondo, “Electro-optical characteristics and switching behavior of the in-plane switching mode”, Appl. Phys. Lett. **67**(26), 3895-3897 (1995).
- 10) C. Lin, “Optical Compensation of a High Transmittance MVA-LCD”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **37**(1), 1075- 1078 (2006).
- 11) K. Kondo, “Recent Advancements and Future Possibilities of IPS-TFT-LCDs”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **36**, 978-981 (2005).
- 12) N. Aoki, S. Komura, T. Furuhashi, M. Adcahi, O. Itou, T. Miyazaki and M. Ohkura, “Advanced IPS technology for mobile applications”, J. Soc. Inf. Disp. **15**(1), 23-29 (2007)
- 13) S. H. Lee, S. L. Lee, H. Y. Kim and T. Y. Eom, “A Novel Wide-Viewing-Angle Technology”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **30**, 202-205 (1999).
- 14) T. Matsushima, K. Seki, S. Kimura, Y. Iwakabe, T. Yata, Y. Watanabe, and S. Komura, “New fast response in-plane switching liquid crystal mode”, J. Soc. Inf. Disp. **26**(10), 602-609 (2018).
- 15) 糸賀隆志、伊藤政隆、高藤裕、「低温ポリシリコン TFT-LCD」、シャープ技報、**69**、64-68 (1997).
- 16) 松尾拓哉、「技術解説 IGZO 技術」、シャープ技報、**104**、13-17 (2012).
- 17) C. W. Tang and S. A. VanSlyke, “Organic electroluminescent diodes”, Appl. Phys. Lett. **51**(12), 913-915 (1987).

- 18) 森竜雄、「トコトンやさしい有機 EL の本 第2版」、日刊工業新聞社、(2015).
- 19) 時任静士、「有機 EL デバイスの高効率化」、ケミカルタイムス(関東化学)、**216**(2)、2-8 (2010).
- 20) J. P. Spindler, W. J. Begley, T. K. Hatwar and D. Y. Kondakov, “High-Efficiency Fluorescent Red- and Yellow-Emitting OLED Devices”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **40**, 420-423 (2009).
- 21) M. A. Baldo, D. F. O’Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson and S. R. Forrest, “Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices”, Nature **395**(6698), 151-154 (1998).
- 22) C. Adachi, M. A. Baldo and S. R. Forrest, “High-efficiency organic electrophosphorescent devices with tris (2-phenylpyridine) iridium doped into electron-transporting materials”, Appl. Phys. Lett. **77**(6), 904-906 (2000).
- 23) A. Endo, M. Ogasawara, A. Takahashi, D. Yokoyama, Y. Kato and C. Adachi, “Thermally Activated Delayed Fluorescence from Sn⁴⁺-Porphyrin Complexes and Their Application to Organic Light Emitting Diodes – A Novel Mechanism for Electroluminescence”, Adv. Mater. **21**(47), 4802-4806 (2009).
- 24) T. Hosokai¹, H. Matsuzaki¹, H. Nakanotani, K. Tokumaru, T. Tsutsui, A. Furube¹, K. Nasu, H. Nomura, M. Yahiro and C. Adachi, “Evidence and mechanism of efficient thermally activated delayed fluorescence promoted by delocalized excited states”, Sci. Adv. **3**(5), (2017).
- 25) 「第5世代移動通信システムについて」、総務省、資料1、(2018).
www.soumu.go.jp/main_content/000579865.pdf

第2章 偏光制御技術の分類と適応性

2.1 はじめに

前章で述べたとおり、モバイル機器に搭載される液晶ディスプレイと有機 EL ディスプレイでは光源から出射した自然光(ランダム偏光)が画像光となるが、画像光は最終的に偏光板を通過することで偏光となる。偏光はランダム偏光と比べると、比較的容易に制御することができる。本研究では、この点に着目し、目的達成のために偏光制御技術を積極的に活用する。本章では、偏光の種類と定義及びその制御技術について整理し、ディスプレイへの適応性や各目的に適用する技術の概要について説明する。

2.2 偏光の種類と定義

光は空間を伝わる電磁波であり、電場(電界ともいう)と磁場(磁界ともいう)の横波である。電場と磁場の振動方向は光の進行方向を回転軸として互いに直交しており、電場が決まれば磁場も決まる。このため光の性質は電場に代表させて論じることができる。光の性質の一つに偏光がある。偏光とは電場の振動方向に規則性がある光のことである。光の電場は時間に対し、光の進行方向 z に直交する面内(xy 面内)で振動する。ここで、時間を t 、光の進行方向における位置を z 、 x 方向の振幅を E_{x0} 、 y 方向の振幅を E_{y0} 、 x 成分と y 成分の位相差を δ 、波数を k 、角振動数を ω とすると、電場ベクトルの x 成分と y 成分は式(2-1)で表すことができる。

$$\begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(kz - \omega t) \\ E_y = E_{y0} \cos(kz - \omega t + \delta) \end{cases} \quad (2-1)$$

また、波長を λ 、光速を c とすると、波数 k と角振動数 ω は以下で表される。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2-2)$$

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \quad (2-3)$$

直線偏光は、図 2-1 に例示するとおり、光の進行方向から観察した際、電場ベクトルが常に決まった方向に振動している光の状態のことである。このため、電場を光の進行方向に対して垂直な面内で、水平方向(x 方向)と垂直方向(y 方向)の二つの成分に分解すると、 E_x と E_y の比は時間によらず一定であり、その位相差 δ は $\pm n\pi$ (n は整数)となる。式(2-4)は、電場ベクトルの方向が水平方

向(x軸)から方位角 ψ 傾いた直線偏光を表し、式(2-1)において位相差 δ を0とし、x成分とy成分の振幅をそれぞれ $E_{x0} = E_0 \cos\psi$ 、 $E_{y0} = E_0 \sin\psi$ と置き換えたものである。

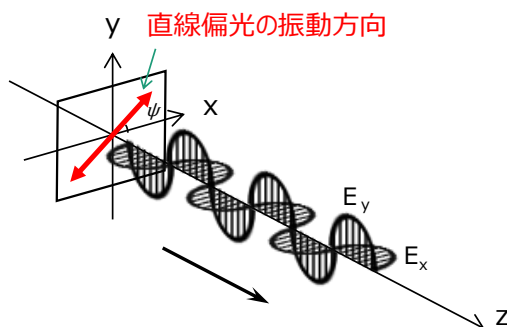


図 2-1 直線偏光

$$\begin{cases} E_x = E_0 \cos\psi \cos(kz - \omega t) \\ E_y = E_0 \sin\psi \cos(kz - \omega t) \end{cases} \quad (2-4)$$

円偏光は、図 2-2 に例示するとおり、光の進行方向から観察した際、電場ベクトルの大きさが常に一定である偏光状態のことである。換言すると、xとyの両成分波が等しい振幅を有し、それらの位相が $\pi/2$ ずれている状態である。式(2-5)は円偏光を表し、式(2-1)において振幅の大きさが $|E_{x0}|=|E_{y0}|=E$ であり、位相差 δ が $\pm \pi/2$ の場合である。

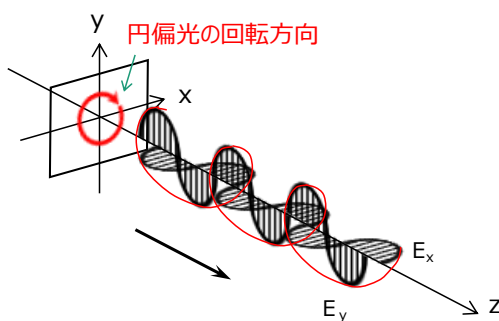


図 2-2 円偏光

$$\begin{cases} E_x = E \cos(kz - \omega t) \\ E_y = \mp E \sin(kz - \omega t) \end{cases} \quad (2-5)$$

なお、図 2-2 に例示するように、 $\delta = \pi/2$ のときに光の進行方向から観察すると、合成された電場ベクトルは角振動数 ω で“時計回り”に回っているように見える。このような光は一般的に右円偏光と呼ばれる¹⁾。一方、 $\delta = -\pi/2$ のときは左円偏光と呼ばれる。

上述のとおり、直線偏光は位相差 δ が $\pm n\pi$ (n は整数) であり、電場の x 成分と y 成分の振幅の比が時間に拠らず一定である。また、円偏光は位相差 δ が $\pm \pi/2 + 2n\pi$ (n は整数) であり、電場の x 成分と y 成分の振幅の絶対値が等しい。これらの条件と異なる偏光は、図 2-3 に例示するとおり、電場ベクトルの軌跡が楕円を描くため、楕円偏光と呼ばれる。つまり、式 (2-1) で表現される偏光は楕円偏光であり、楕円偏光の楕円の短径がゼロになったものを直線偏光とみなすことができ、また、楕円の長径と短径が等しい場合を円偏光とみなすことができる。

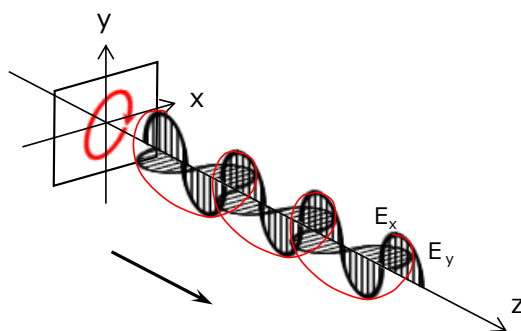


図 2-3 楕円偏光

図 2-4 は異なる固体どうしや、気体と固体など二つの異なる相が互いに接触している平坦な境界面(界面)に光が入射するときの様子を示す。光が界面に入射角度 θ_{in} (境界面に対する垂線からの極角) で入射するとき、入射光を含み界面に垂直な面を入射面とすると、電界の振動方向が入射面内にある偏光をp偏光、入射面に垂直な方向に電界が振動する偏光をs偏光と称する。また、反射光はその反射角度 θ_{ref} が入射角度 θ_{in} と等しく、出射光(屈折光)とともに入射面に含まれる。

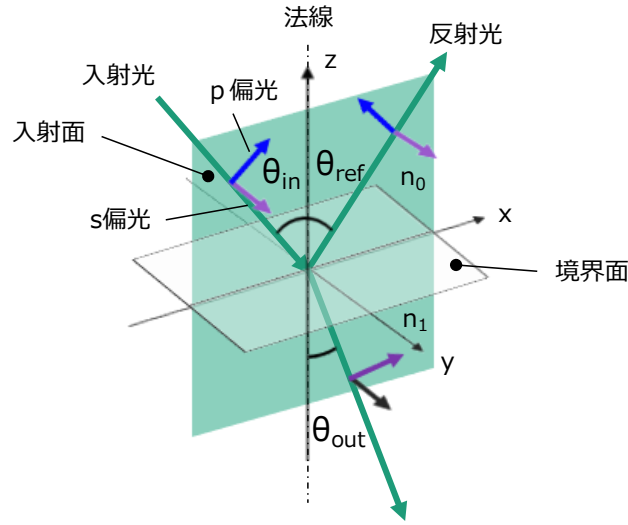


図 2-4 光の反射及び屈折とp偏光とs偏光

ここで、光入射側の屈折率を n_0 、光出射側の屈折率を n_1 とすると、入射角度 θ_{in} と出射角度 (屈折角) θ_{out} の関係は、スネルの法則 (式 (2-6)) で表すことができる。

$$n_0 \sin \theta_{in} = n_1 \sin \theta_{out} \quad (2-6)$$

また、その際の透過率と反射率はフレネルの式 (式 (2-7) ~ (2-14)) から求めることができる。ここで、p偏光の振幅透過率を t_p 、振幅反射率を r_p 、s偏光の振幅透過率を t_s 、振幅反射率を r_s とし、p偏光のエネルギー透過率を T_p 、エネルギー反射率を R_p 、s偏光のエネルギー透過率を T_s 、エネルギー反射率を R_s とする。

$$t_p = \frac{2n_0 \cos \theta_{in}}{n_1 \cos \theta_{in} + n_0 \cos \theta_{out}} \quad (2-7)$$

$$t_s = \frac{2n_0 \cos \theta_{in}}{n_0 \cos \theta_{in} + n_1 \cos \theta_{out}} \quad (2-8)$$

$$r_p = \frac{n_1 \cos \theta_{in} - n_0 \cos \theta_{out}}{n_1 \cos \theta_{in} + n_0 \cos \theta_{out}} \quad (2-9)$$

$$r_s = \frac{n_0 \cos \theta_{in} - n_1 \cos \theta_{out}}{n_1 \cos \theta_{in} + n_0 \cos \theta_{out}} \quad (2-10)$$

$$T_p = \frac{\tan\theta_{in}}{\tan\theta_{out}} t_p^2 \quad (2-11)$$

$$T_s = \frac{\tan\theta_{in}}{\tan\theta_{out}} t_s^2 \quad (2-12)$$

$$R_p = r_p^2 \quad (2-13)$$

$$R_s = r_s^2 \quad (2-14)$$

なお、高屈折率な媒体から低屈折率の媒体に光が入射する際、入射角度を徐々に大きくするとある角度で屈折角が 90° となり、全ての光を反射するようになる。この現象は全反射と呼ばれる。全反射が生じる角度は臨界角 θ_c と呼ばれ、式(2-15)から求めることができる。

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_0}\right) \quad (2-15)$$

図 2-5 は屈折率 $n_0=1.0$ の媒体からそれよりも屈折率が高い屈折率 $n_1=1.5$ の媒体へ光が入射する際の入射角度とp偏光、s偏光の透過率及び反射率の関係を示したものである。このように屈折率が異なる媒体の界面に光が入射する際、p偏光の反射率がゼロとなり、s偏光のみが反射する角度がある。これをブリュースター角 θ_B と呼び、式(2-16)から求めることができる。

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_1}{n_0}\right) \quad (2-16)$$

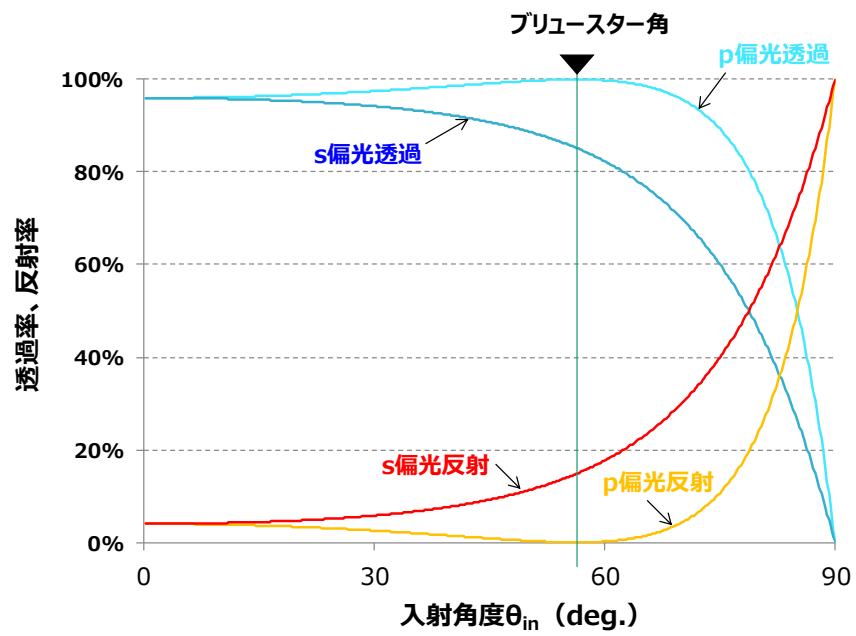


図 2-5 入射角度と透過率、反射率の関係 ($n_0=1.0, n_1=1.5$)

2.3 偏光制御技術の分類

2.3.1 偏光の抽出

一般に電球などの光源から放射される光は電場の方向が規則的ではない。このような光を自然光あるいはランダム偏光と呼び、ランダム偏光から偏光を取り出すこと(抽出すること)が可能である。ランダム偏光から直線偏光を取り出す機能を有する光学素子を偏光子と呼ぶ。偏光子を実現する方法は種々ある。

図 2-6 に二色性偏光子を示す。二色性偏光子は光を入射した際、特定の直線偏光を強く吸収することで、吸収された直線偏光と振動方向が直交する直線偏光が透過するというものである。例えば、ポリビニルアルコールにヨウ素化合物分子または染料を含浸、吸着させ、延伸(配向)することで偏光子を実現したフィルムが偏光板として電子ディスプレイに使用されている。

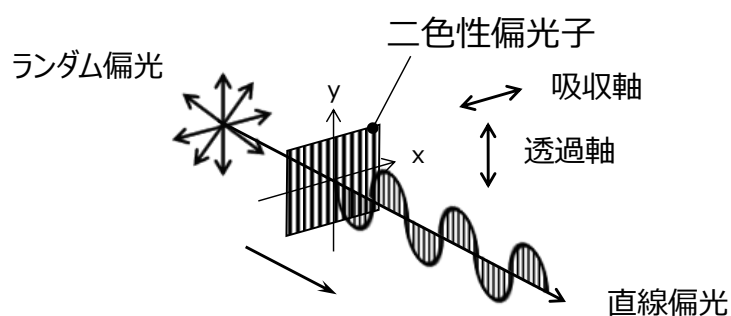


図 2-6 二色性偏光子

直線偏光を取り出す方法としては吸収のほかに分離がある。分離の方法は種々ある。図 2-7 はウォラストンプリズムと呼ばれる偏光子で、二つの複屈折結晶プリズムをその遅相軸が互いに直交するように組み合わせたものである。二つのプリズムの界面に斜めに入射した光は、電場の振動方向に対する屈折率の違いによって二つの直線偏光に分離する。

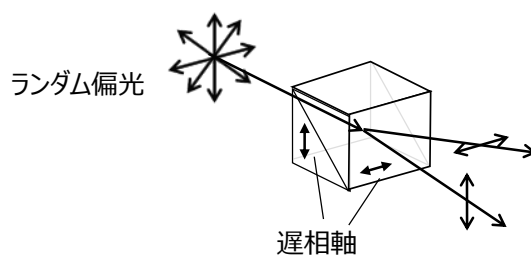


図 2-7 ウォラストンプリズム

この他に2つの複屈折プリズムを利用した偏光子としては、二つのプリズムの境界において全反射により一方の直線偏光を除去する偏光子(ニコルプリズム、グラントムソンプリズムなど)がある。あるいは、ブリュースター角を利用して、p偏光の反射を零とし、s偏光のみを反射光として得るようにしたプリズム型の偏光子がある。この場合、p偏光はロスなく透過し、反射したs偏光の分、p偏光成分の多い光が透過光として得られる。

図 2-8 に金属などの導電体線(ワイヤー)を連子状に配列したワイヤーグリッド偏光子を示す。ワイヤーグリッド偏光子は、ワイヤーのピッチ P_w よりも十分に長い波長 λ の電磁波に対して機能する。ワイヤーグリッド偏光子に光が入射すると、電場の振動方向がワイヤーの長手方向と平行な直線偏光は自由電子が電場に平行に振動し励起するため反射し、遮断される。一方、電場の振動方向がワイヤーの長手方向と垂直な直線偏光は振動方向の線幅が小さく自由電子の振動が制限されるため透過する。例えば可視光であれば $P_w = 100 \sim 150 \text{ nm}$ とすることでワイヤーの長手方向と同じ振動方向の直線偏光は反射し、直交する直線偏光は透過する偏光子を実現できる。

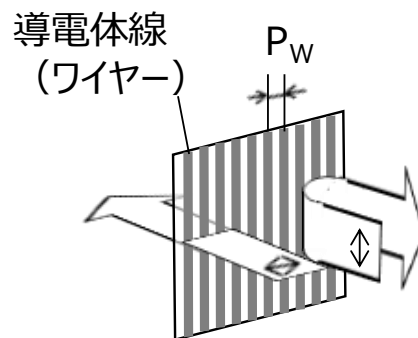


図 2-8 ワイヤーグリッド偏光子

図 2-9 は複屈折性フィルムを多積層した反射型偏光子²⁾の構成を示す。この偏光子は複屈折性フィルムと光学的に等方なフィルム(等方性フィルム)を繰り返し積層したもので、複屈折性フィルムは等方性フィルムに対し、y軸方向の屈折率のみを大きくし、x軸方向とz軸方向の屈折率は等しくする。この場合、反射させたい波長に応じて各フィルムの厚さを調整することで、y軸方向と平行な振動方向の直線偏光はブラッグ反射により反射し、直交する方向の直線偏光は透過する偏光子を実現できる。

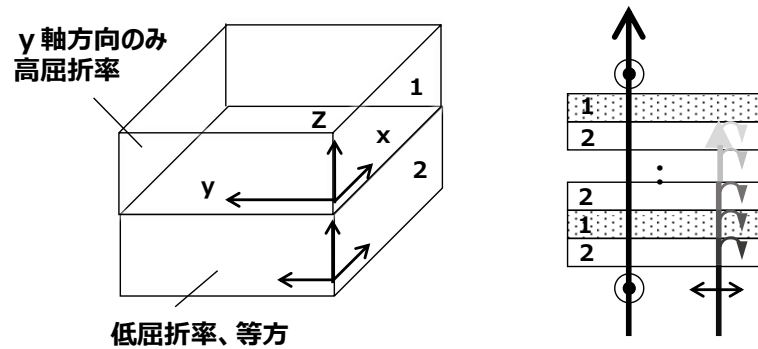


図 2-9 複屈折性フィルムを多積層した反射型偏光子

上述の偏光子は直線偏光を取り出すものだが、円偏光を取り出すことができる手段も存在する。具体的には、コレステリック液晶を用いることで円偏光を取り出すことができる。図 2-10 にコレステリック液晶の構造を示す。コレステリック液晶は複数の平行配列した液晶分子の層が、その分子長軸の方向を少しずつ回転するようにずらしながら積層され、らせん状の構造となったものである³⁾。換言すると、コレステリック液晶は液晶分子がらせん状にねじれた配向をしている⁴⁾。

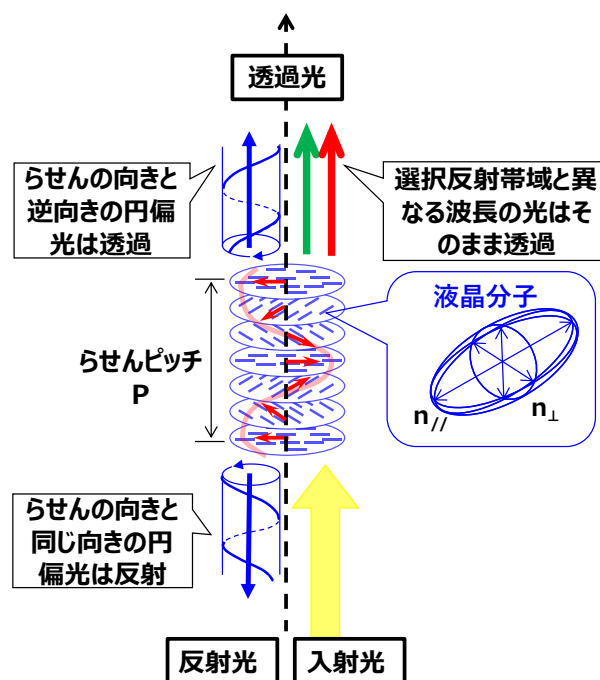


図 2-10 コレステリック液晶の構造

コレステリック液晶に入射する光は、ブラッグ反射により、らせんピッチに対応した波長の光であって、らせんの向きと同じ回転方向の円偏光を反射(選択反射)し、それ以外の光は透過する。ここで、コレステリック液晶のらせんピッチを P 、液晶分子の平均屈折率を n_m 、液晶分子の長軸方向と短軸方向の屈折率差を Δn とすると、選択反射の中心波長 λ_0 は式(2-17)、波長帯域 $\Delta \lambda$ は式(2-18)で表すことができる。

$$\lambda_0 = n_m P \quad (2-17)$$

$$\Delta \lambda = \Delta n P \quad (2-18)$$

なお、液晶の分子長軸の屈折率を $n_{//}$ 、短軸の屈折率を n_{\perp} 、とすると、液晶分子の平均屈折率 n_m と屈折率差 Δn はそれぞれ次式で表される。

$$n_m = \sqrt{(n_{//}^2 + n_{\perp}^2)/2} \quad (2-19)$$

$$\Delta n = n_{//} - n_{\perp} \quad (2-20)$$

2.3.2 偏光状態の変更

複屈折性を示す物質に偏光を入射することで偏光状態を任意に変えることが可能である。複屈折性の一種に旋光がある。物質に直線偏光が入射したときにその偏光軸を回転させる性質を旋光性という。また、特に磁場を加えることなく生じる旋光性を光学活性ともいう⁴⁾。直線偏光は2つの円偏光、すなわち右円偏光と左円偏光の合成とみなすことができる。旋光性を有する物質に直線偏光が入射すると、物質中を進む光はそれぞれの円偏光に対する伝搬速度が異なることで位相がずれるため、結果としてそれらが合成された直線偏光の偏光軸は回転する。

また、ポリカーボネートなどの高分子フィルムを一軸延伸すると、複屈折性を持たせることができる。この場合、2つの直交する直線偏光に対して伝搬速度が異なる媒体となり、その屈折率の差を Δn 、フィルムの厚さを d とすると位相差 Δnd の位相差フィルムを実現できる。位相差 Δnd が π （半周期）、すなわち $1/2$ 波長となる位相差フィルムを直線偏光の振動方向に対し、その遅相軸（屈折率が高い軸）が 45° となるように配置すると直線偏光の振動方向を 90° 回転させることができる。また、位相差 Δnd が $\pi/2$ 、すなわち $1/4$ 波長となる位相差フィルムであれば、直線偏光を円偏光に変えることができる。

棒状の液晶分子を一方向に配向した液晶層を形成することでも、複屈折性を示す透明媒体を実現できる。この際、液晶分子の長軸方向と短軸方向の屈折率差を Δn 、液晶層の厚さを d とすると位相差 Δnd の複屈折媒体を実現できる。図 2-11 は $\Delta nd = \pi$ の液晶層に、液晶層を構成する液晶分子長軸に対し、 45° 傾いた方向に振動する直線偏光を入射したときの模式図である。この場合、 $1/2$ 波長の位相差フィルムと同様、入射した直線偏光はその振動方向が 90° 回転する。なお、液晶分子の配向方向は配向膜などで規定することができる。また、液晶層に電界をかけることで、液晶分子の配向方向は任意に制御することが可能である。このため、液晶は偏光状態を動的に変える手段として優れており、液晶ディスプレイはまさにこの液晶の特性を利用したものである。

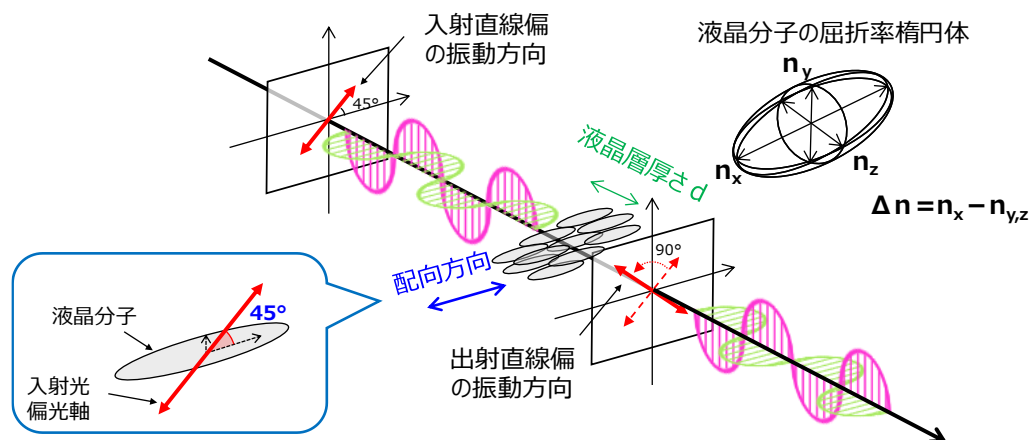


図 2-11 液晶層による直線偏光の振動方向の変更

屈折率が異なる媒体の界面に斜めに入射した光は、上述のフレネルの式から導き出されるとおり、p偏光とs偏光で反射率が異なる。このp偏光とs偏光の反射率の違いによって偏光状態を変えることが可能である。

また、高屈折率な媒体から低屈折率な媒体に光が入射する際に生じる全反射では、p偏光とs偏光で位相のずれが生じる。図 2-12 は全反射の際の位相のずれの一例であり、屈折率 1.58 の媒体

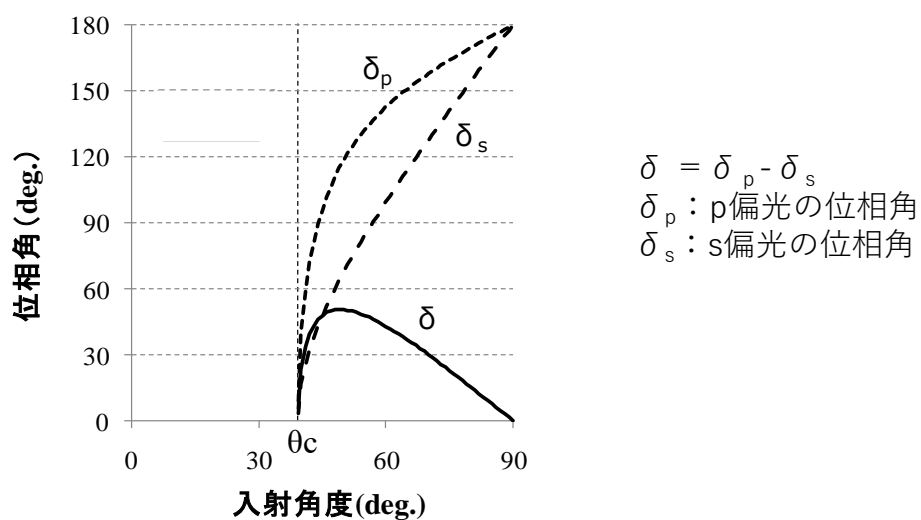


図 2-12 全反射の際の位相のずれ(計算値)

と空気(屈折率 1.0)との界面で生じる位相のずれの計算値である。図 2-13 に示すフレネル菱面体はこの現象を利用して偏光状態を変えるものである。フレネル菱面体は、一回の全反射でp偏光とs偏光の位相角の差が 45° 、すなわち $1/8$ 波長の位相差となる反射を 2 回経たのち、入射時と同じ進行方向に光が出射するように設計される。このため、フレネル菱面体に入射する光は、2 回の反射でトータル $1/4$ 波長の位相差が与えられた後、同じ進行方向に光が出射する。例えば、図示のとおり、反射面に対し、 45° 傾いた方向に振動する直線偏光を入射すると、円偏光が得られる。あるいは、円偏光を入射すると直線偏光を得ることができる。

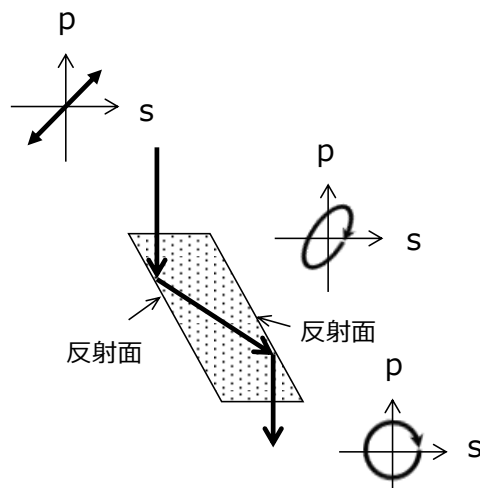


図 2-13 フレネル菱面体

2.3.3 偏光制御技術の分類

図 2-14 に偏光制御技術の分類を示す。この図は 2.3.1 項及び 2.3.2 項で述べたことを整理したものである。ランダム偏光から偏光を取り出す方法や偏光状態を変える(変更する)方法は既に確立しており、液晶ディスプレイはまさに「偏光状態を制御する技術」を使うことで画像の表示を実現している。本研究では、技術課題である液晶ディスプレイや有機 EL ディスプレイの低消費電力化と、視野角の動的制御を実現する視野角制御素子に偏光制御技術を活用する。次節では、偏光制御技術の電子ディスプレイへの適応性と、具体的にどの技術を課題の対策に適用するのかを述べる。

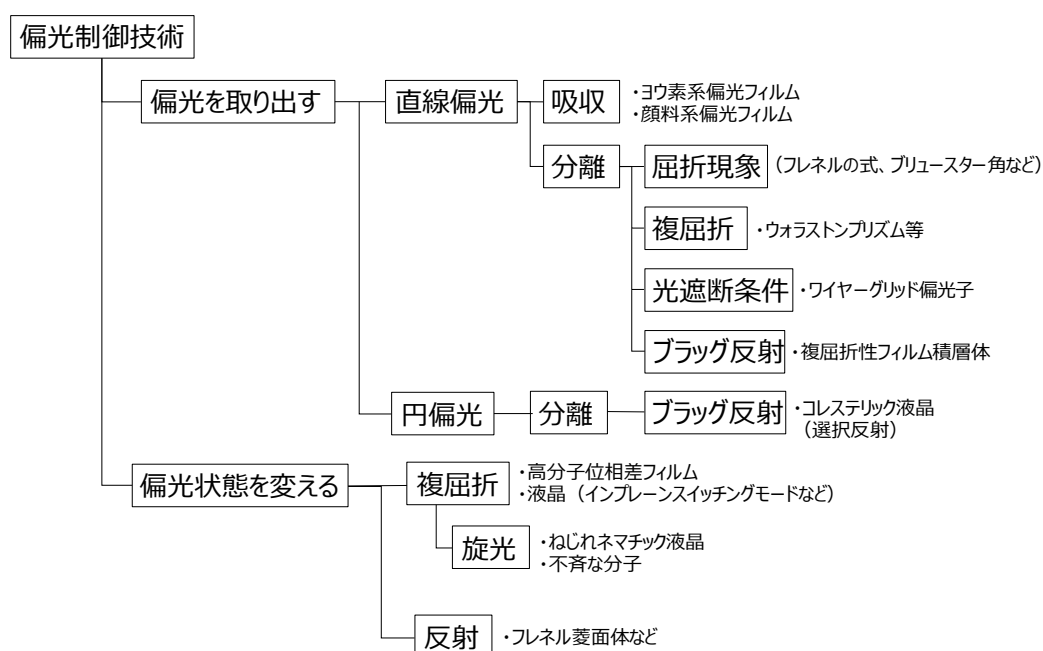


図 2-14 偏光制御技術の分類

2.4 電子ディスプレイへの要求と適用する偏光制御技術

表 2-1 は、前節で述べた偏光制御技術の電子ディスプレイへの適応性について整理したものである。ランダム偏光から直線偏光を取り出す技術では、フィルム状の二色性偏光子が薄く、軽いいため、電子ディスプレイに幅広く利用されている。屈折現象による直線偏光の取り出しは、光の入射角度依存性が高いなどの制約はあるが、既存部材の設計変更により利用することが可能であり、コストや厚みの面でメリットが得られる可能性がある。複屈折を利用して直線偏光を分離する技術は、プリズムタイプの場合には容積が大きくなる。このため薄型・軽量が求められるモバイル機器用途には不向きと考えられる。光遮断条件で作成したワイヤーグリッドは機能する部分が薄く、フィルム上にも形成可能なため反射型偏光子として利用できる。ブラッグ反射を利用する複屈折性フィルムの多積層体から成る反射型偏光子²⁾は、反射型偏光フィルムとして液晶ディスプレイに広く利用されている。コレステリック液晶の選択反射を利用して円偏光を取り出す光学部材は、反射波長帯域の選択が比較的容易であり、高分子液晶によりフィルム化が可能である。実際に 1/4 波長フィルムと組み合わせることで反射型偏光フィルム(輝度向上フィルム)として液晶ディスプレイに使用された実績がある。

表 2-1 偏光制御技術の電子ディスプレイへの適応性

機能			状況	適応性
機能	手段			
直線偏光を取り出す	吸収	二色性	・薄く軽量なため、液晶ディスプレイ等に使用中	○
	分離	屈折現象	・光の入射角度依存性が高いなどの制約はあるが、既存部材の設計変更で利用可能であり、厚みやコストの面でメリットが得られる可能性がある	○
		複屈折	・プリズムの場合、体積が大きくなるためモバイル機器用の電子ディスプレイには不向き	×
		光遮断条件	・機能する部分は薄く、フィルム上に形成可能であり反射型偏光子として使用可能	○
		ブラッグ反射	・反射型偏光フィルムとして液晶ディスプレイに使用中	○
円偏光を取り出す	分離	選択反射	・反射波長帯域の選択が可能であり、高分子液晶によりフィルム化できる ・1/4波長フィルムと組み合わせることで反射型偏光フィルムとして使用実績あり	○
偏光状態を変える	複屈折		・高分子フィルムによる位相差板として使用中 ・インプレーンスイッチングモードなどとして液晶ディスプレイに使用中	○
		旋光	・ねじれネマチック液晶として液晶ディスプレイに使用中	○
	反射		・1度の反射による変化が小さいため複数回反射する構造が必要となる	△

偏光状態を変える技術としては、有機 EL ディスプレイの円偏光板や液晶ディスプレイに対し、高分子フィルムによる位相差板として複屈折性が幅広く利用されている。また、液晶の複屈折性はインプレーンスイッチングモードなどで液晶ディスプレイの光変調素子(画素)に利用されている。さらに旋光はねじれネマチック液晶において液晶ディスプレイの光変調素子(画素)に利用されている。

反射によって偏光状態を変える技術は、一度の反射による変化が小さいため、複数回反射する構造が必要になる。フレネル菱面体の様な構造は、容積が必要になるためモバイル機器用途には不向きと考える。しかし、バックライトの導光板を導波する光の偏光状態を変えるため、導光板に微細な構造を設けるというアイデア⁶⁾⁷⁾であれば利用できる可能性がある。

第1章で述べたとおり本研究の目的は、超高速通信が利用できる環境において、モバイル機器に搭載される電子ディスプレイに期待される機能を実現することにある。具体的には、モバイル機器の長時間使用のための低消費電力化と、公共の場でのプライバシー確保と利便性を両立するための視野角の動的制御(視野角制御機能)の実現である。電子ディスプレイの低消費電力化については、液晶ディスプレイと有機 EL ディスプレイは共に偏光板での吸収損失を低減し、光利用効率を向上することでその実現を目指す。液晶ディスプレイについては、第3章で詳述するとおり、ディスプレイの厚みやコストの低減も考慮して、既存部材の設計変更で対応可能な屈折現象の適用を検討した。具体的には、フレネルの式から求められるとおり、屈折界面においてp偏光の透過率がs偏光よりも高くなることを積極的に利用して、p偏光をより多く出射するように構成した偏光バックライトの検討を行った。有機 EL ディスプレイについては第4章で詳述するとおり、三原色の中で有機 EL 素子の発光効率が最も低い青色に着目し、青色光の偏光板での吸収損失低減による光利用効率の向上を検討した。具体的にはコレステリック液晶による選択反射を利用することで、従来、偏光板で吸収され損失となっていた青色光を、偏光板で吸収される前にコレステリック液晶で反射し、再利用する光リサイクル構造(新方式)を考案し、その効果を検証した。視野角の動的制御に関しては、第5章で詳述するとおり、画面の前面に配置することで、斜め方向の画像の明るさのみを任意に変調できる視野角制御素子を検討した。視野角制御素子には、液晶の複屈折性を利用する偏光制御技術を用いた。

以上の整理として、表 2-2 に電子ディスプレイの技術課題と対策及び適用する偏光制御技術を示す。

表 2-2 電子ディスプレイの技術課題と対策及び適用する偏光制御技術

技術課題	ディスプレイ 種類	対策	適用する 偏光制御技術
光利用効率の向上 偏光板による 吸収損失低減	液晶 ディスプレイ	既存部材の設計変更により、バックライト出射光の直線偏光の割合を高め、偏光板による吸収損失を低減する	屈折界面におけるp/s偏光の透過率差（フレネルの式）
	有機EL ディスプレイ	光リサイクル構造により、発光効率が低い青色光の偏光板での吸収損失を低減する	コレステリック液晶による選択反射
視野角制御素子 斜め方向の画像のみ 任意に変調	液晶、 有機EL 共通	正面方向には作用せず、斜め方向のみ任意に透過率を変えることができる外付けの視野角制御素子を実現する	液晶の複屈折による偏光状態変化

参考文献

- 1) E. Hecht、(尾崎義治、朝倉利光訳)、「ヘクト 光学Ⅱ－波動光学－」、丸善出版(株)、70-71 (2003)。
- 2) M. F. Weber, C. A. Stover, L. R. Gilbert, T. J. Nevitt and A. J. Ouder Kirk, “Giant Birefringent Optics in Multilayer Polymer Mirrors”, Science **287**(5462), 2451-2456 (2000).
- 3) 液晶便覧編集委員会編、「液晶便覧」、丸善(株)、280-292 (2000)。
- 4) 岡野光治、小林駿介、「液晶－基礎編」、(株)培風館、226 (1985)。
- 5) 吉野勝美、尾崎正則、「液晶とディスプレイ応用の基礎」、(株)コロナ社、94－95 (1994)。
- 6) 足立昌哉、杉田辰哉、「照明装置および液晶表示装置」、特許第 5055398 号、(2012.8.3)。
- 7) M. Adachi and T. Sugita, “Illuminating device and liquid crystal display device”, US patent 9,829,622B2, (2017.11.28)。

第3章 液晶ディスプレイの光利用効率の向上¹⁾

3.1 はじめに

液晶ディスプレイは有機 EL ディスプレイに代表される自発光型のディスプレイとは異なり、非発光型のディスプレイであり、照明光を出射するバックライトとこの照明光の透過光量を調整することで画像を形成する液晶パネルとから構成される。液晶パネルの透過率は主として、部材透過率(偏光板やカラーフィルターなど光吸収性部材の透過率)、開口率(1画素のうち、表示に有効な領域の面積比率)、液晶表示効率(液晶分子の配向によって決定される最大透過率)の3つから決まる。部材透過率はこれら3要因の中で最も低いため、液晶パネルの透過率向上にとって最大の課題となっている。部材透過率を下げる大きな原因の一つが偏光板である。偏光板は入射する光のうち、所定の方向に振動面をもつ直線偏光は吸収し、これと直交する直線偏光は透過するという性質を有する。このため、バックライトの出射光がランダム偏光であれば、約半分の光が偏光板で吸収され損失となる。偏光板での吸収損失を抑制する手段として、液晶パネルとバックライトとの間に反射型偏光フィルムを設ける方法がある。反射型偏光フィルムとしては直線偏光を反射するタイプ²⁾と円偏光を反射するタイプ³⁾とがあり、円偏光を反射するタイプは1/4波長板と組み合わせることで透過光を直線偏光に変換する。

反射型偏光フィルムはいずれのタイプもバックライトからの出射光の内、液晶パネル裏面の偏光板を透過する直線偏光は透過し、吸収される直線偏光は偏光板で吸収される前に反射する。反射型偏光フィルムで反射した光はバックライトに戻り、そこで反射する際にその一部が偏光解消した後、再び反射型偏光フィルムに入射し、その一部が透過する。これを繰り返すことで液晶ディスプレイの輝度が向上するため、反射型偏光フィルムは現在、様々な液晶ディスプレイに適用されている。反射型偏光フィルムは高い効果が得られるがその追加により厚みは増加し、コストが上昇する。このため、偏光板での吸収損失を低減する方法として、バックライトの出射光自体に特定の直線偏光が多く含まれるようにする技術の検討が行われている。例えば導光板に偏光ビームスプリッタとマイクロプリズムを備えたバックライト⁴⁾、導光板に等方性部材と非等方性部材から成る微細な界面を形成し、全反射を利用してs偏光を積極的に取りだすように構成したバックライト^{5)~7)}が検討されている。あるいは直線偏光を出射する光源と、偏光状態を維持する導光板とを組み合わせることで偏光度の高い直線偏光を出射するようにしたバックライトが検討されている⁸⁾。これらの方法は、いずれも特別な部材や構造を必要とするためコストが高くなると予想される。

本研究の目的は、液晶ディスプレイの消費電力低減のため、特定の直線偏光をより多く出射する偏光バックライトを実現することにある。この際、ディスプレイの厚みやコストの低減も考慮して、既存部材の設計変更で対応可能な屈折現象の適用を検討する。具体的には屈折界面において、フレネルの式から導き出されるとおり、p偏光の透過率がs偏光よりも高くなることを積極的に利用する。本章では、この偏光バックライトの基本コンセプト、設計指針及び試作による検証結果¹⁾⁹⁾について詳述する。

3.2 液晶ディスプレイの低電力化に向けた課題

図 3-1 に従来のバックライトの構成の一例を示す。従来のバックライトは、光源、導光板、導光板の裏面に配置する反射シートと、導光板の表の面に順に配置する拡散シート及び 2 枚のプリズムシートから構成される。光源としては複数の白色 LED (Light Emitting Diode) を用い、それらを導光板の一側面に整列配置する。2 枚のプリズムシートは同じ構造であり、断面形状がほぼ左右対称で、その頂角が約 90° のプリズム列を有する。2 枚のプリズムシートはプリズム列をおもて側に向け、さらに互いのプリズムの稜線がほぼ直交するように配置する。フレーム等は図示しないが、それにより各構成部材は固定される。光源から出射し、導光板に入射した光は一部の光を導光板から出射しつつ導波し、導光板から出射した光は、直接、あるいは反射シートで反射したのち、面状の光となつて出射する。出射した面状の光は、拡散シート及びプリズムシートによってその進行方向を正面方向に向けられると共に、面内の均一性を高められて液晶パネルに向かう。

液晶パネルに入射した光は、画像情報に応じてその透過率が制御されて画像光となる。液晶パネルにおける透過率の制御は液晶分子に数ボルトの電圧で電界を与えることで実現するため、大きな電力は必要としない。液晶パネルでは、回路の充放電などにも電力を要するが、バックライトの電力と比較すると小さい。例えば、対角 6 インチ (15.2cm) の液晶ディスプレイの場合、全体の消費電力 2.6W の内訳が、バックライト 2.2W、周辺回路 0.4W との報告がある¹⁰⁾。このように、液晶ディスプレイでは、電力の大半がバックライトで消費されるため、バックライトの電力低減は液晶ディスプレイの低消費電力化に極めて効果が高い。バックライトで電力を消費しているのは光源である。光源の消費電力を低減するには、光源から出射すべき光の量を減らせば良く、そのためには光利用効率を高めれば良い。バックライト出射光の光利用効率は液晶パネルの透過率で決まる。液晶パネルの透過率、すなわち光利用効率は次式で表現できる。

$$\text{光利用効率(透過率)} = \text{部材透過率} \times \text{開口率} \times \text{液晶表示効率} \quad (3-1)$$

ここで、部材透過率は、液晶パネルに使用されるカラーフィルターや偏光板などの透過率である。開口率は、液晶パネルの配線や画素回路など、液晶による変調を受けない領域を除いた表示に有効な領域の面積比率である。液晶表示効率は、液晶によって定まる光利用効率のことであり、画素の開口部において液晶分子の配向によって決定される最大の透過率である。部材透過率はこれら 3 要因の中で最も低いため、液晶パネルの光利用効率向上にとって最大の課題である。部材透過率を下げる大きな原因の一つが偏光板である。偏光板は入射する自然光(ランダム偏光)の

50%以上を吸収し、吸収された光は損失となる。そこで本研究では、偏光板での吸収損失低減のため、特定の直線偏光をより多く出射する新たなバックライトについて検討した。

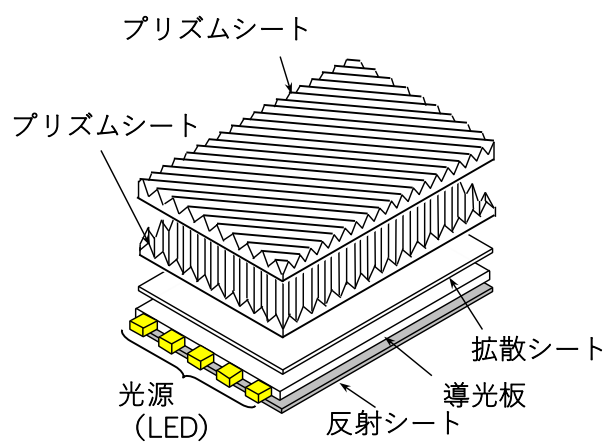


図 3-1 従来のバックライトの構成

3.3 新しいバックライトの構成と評価方法

3.3.1 新しいバックライトの基本構成

図 3-2 に本研究で開発したバックライトの基本構成を示す。また、図 3-3 に本開発のバックライトの一部断面図を示す。このバックライトは光源、導光板、反射シート、プリズムシート及び指向性拡散シートから構成され、従来のバックライトと比較すると、プリズムシートを 1 枚に半減することで薄型化や低コスト化に有利になることを目指している。従来のバックライトと同様、光源から出射して導光板に入射した光は、光の一部を導光板から出射しながら導光板内を導波する。導光板から出射した光は直接、あるいは反射シートで反射した後、面状の光となってプリズムシートへ向かう。この際、従来のバックライトとは異なり、導光板から出射した光は、拡散シートの作用を受けることなく直接、プリズムシートに入射し、プリズムシート及び指向性拡散シートによってその進行方向が正面方向に向けられる。次節(3.4 節)で詳述するが、本開発のバックライトは構成部材の各屈折界面において、p 偏光の透過率が s 偏光よりも高いことを積極的に利用することで、特定の偏光成分をより多く含む光を出射するように構成する。このため、導光板から出射する p 偏光成分が多い光の偏光状態を維持し、利用するため、

拡散シートのように偏光状態を乱す部材は導光板の直上部には配置しない構成とする。また、本開発のバックライトは大きなコストアップにつながるような、特殊な部材や特別な構造は用いず、既存の生産設備で製造可能な部材によって構成する。

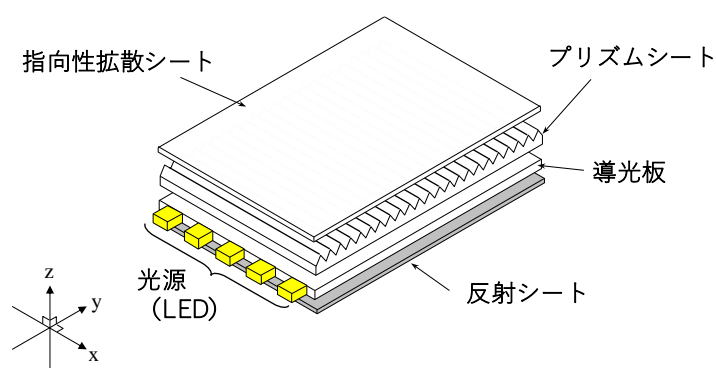


図 3-2 本開発のバックライトの基本構成

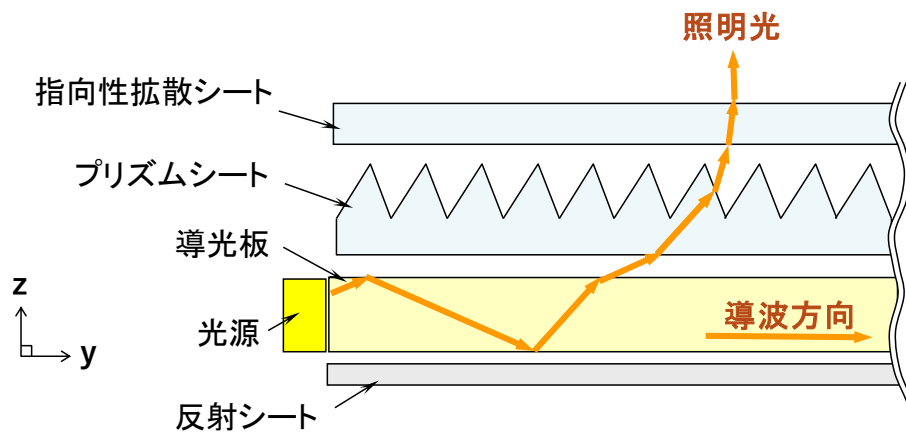


図 3-3 本開発のバックライトの一部断面図

3.3.2 評価方法と偏光度の定義

バックライトの輝度の測定には、色彩輝度計(BM-7A:トプコン製、スポット径 0.2°)を使用した。輝度の角度依存性の測定は、アームに取り付けた輝度計を測定対象物を中心に所定の角度回転し、その都度、輝度測定することで実現した。また、全方位の輝度分布測定には視野角特性測定評価装置(EZContrast, ELDIM 社製)を使用した。測定に用いたバックライトは照明の有効領域が 66mm×37mm(対角 2.98 インチ)であり、照明領域の中心を測定点とした。

図 3-4 に偏光度の測定系を示す。同図には方位角 ϕ の定義も記載した。導光板の 4 つの側面のうち、光源(LED)が近接配置され、光入射面となる側面の長手方向を x 軸と定義する。また、光源から出射して導光板に入射した光が導光板を導波する際の主たる方向(導波方向)を y 軸とし、導光板の光出射面に対する垂線方向を z 軸と定義する。図示のとおり、x 軸の + 方向を方位角 0° とし、反時計回りを方位角の + 方向と定義する。また、極角 θ (視角)の + 方向は、y 軸の + 方向とする。検光子には偏光フィルム(日東電工製, SEG1425DU)を使用した。後述するとおり、導光板から出射する光が最大輝度となる方向は yz 平面に含まれる。このため、特に yz 平面を進む光に着目し、検光子の透過軸(吸収軸と直交する軸)が yz 平面と平行なときの輝度を I_{pmax} (p 偏光輝度)、直交するときの輝度を I_{pmin} (s 偏光輝度)とし、p 偏光に対する偏光度 ρ_p (p 偏光度)を式(3-2)で定義する。

$$\rho_p = (I_{pmax} - I_{pmin}) / (I_{pmax} + I_{pmin}) \quad (3-2)$$

偏光度以外の測定では、y 軸(yz平面)と平行な方向に透過軸を有する検光子(偏光フィルム)を、液晶パネルの偏光板を模した形で、バックライトの光出射面に配置して偏光輝度を測定する。この輝度も、yz平面に振動方向を有する直線偏光に対する輝度であるため、本研究では、p 偏光輝度と呼ぶ。なお、方位角 $\phi = 90^\circ$ 及び 270° 以外の方向に進む光に対しては、yz平面と平行な方向に振動する直線偏光は、必ずしも p 偏光ではない。しかし、本研究では主として、yz平面に含まれる光に着目し議論を進めるため、yz平面と平行な方向に振動する直線偏光を p 偏光と呼び、方位角 $\phi = 90^\circ$ 及び 270° 以外の方位に進む光の輝度に対しても、便宜上、この測定で得られる輝度を p 偏光輝度と呼び議論を進めることをここに注記する。

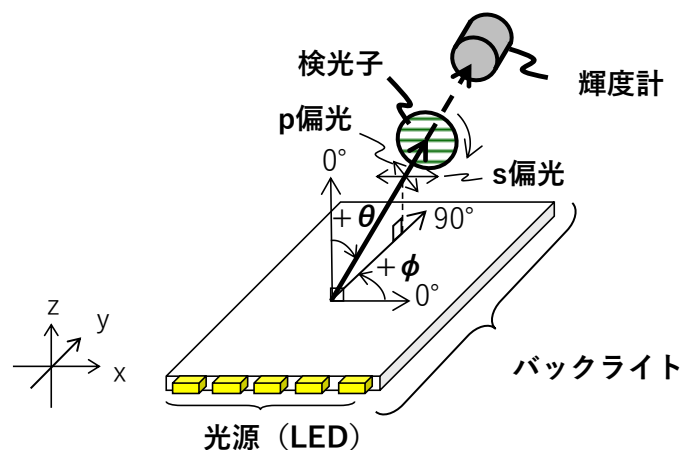


図 3-4 偏光度の測定系

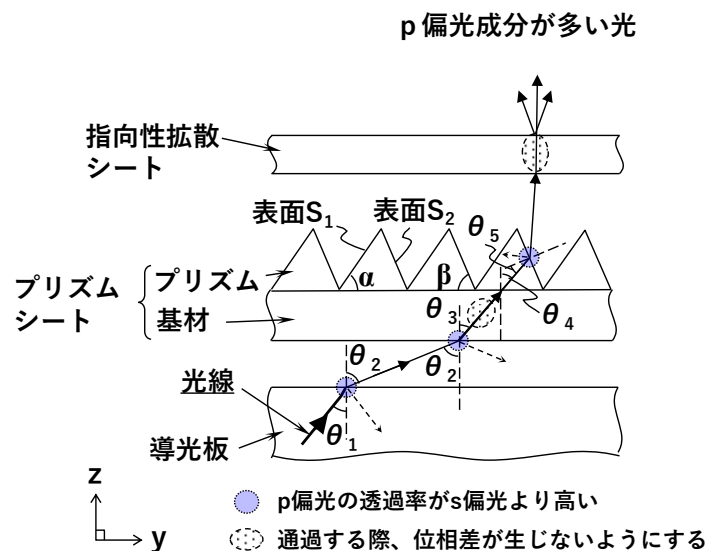
3. 4 偏光バックライトの構造

3. 4. 1 p 偏光有効利用のコンセプト

空気と透明部材との界面のように屈折率が異なる物質どうしの界面では、斜めに入射した光は屈折する。この際、第 2 章で述べたとおり、p 偏光と s 偏光では透過率及び反射率が異なり、その透過率や反射率はフレネルの式から、また、その屈折角度はスネルの法則から求めることができる。

図 3-5 は本開発の偏光バックライトのコンセプト説明図であり、バックライトの一部構造を示す断面図である。屈折界面における透過率は、フレネルの式から求められるとおり、p 偏光が s 偏光より高くなる条件が存在する。この条件を積極的に利用するため、プリズムシートはその表側にプリズム列を備え、プリズム稜線の方法は光源が配置される導光板側面の長手方向 (x 軸方向) に対して平行とする。この構造において導光板から出射し、プリズムシートをワンパスで通過する光を主たる照明光として利用する。この際、導光板の表面、プリズムシートの裏面及びプリズム列の表面の各界面において p 偏光の透過率が高くなることを相乗的に利用するため、プリズムシートは通過する光の偏光状態を維持できるように、複屈折性がない光学的に等方な材料で構成する。

以下、プリズムシートと指向性拡散シートの詳細について、図 3-5 も参照しながら順に説明する。



3.4.2 プリズムシートの構造

図 3-6 はバックライトを構成する光学部材の各界面における透過率の入射角度依存性(計算値)を示す。屈折率 1.58 は導光板及びプリズムシートの基材の屈折率、屈折率 1.6 はプリズムシートのプリズムの屈折率に概ね相当する値である。

図 3-7 は本検討に用いた導光板から出射する光の方位角 $\phi = 90^\circ$ における、p 偏光輝度及び s 偏光輝度の極角(角度)依存性を示す。導光板から出射する p 偏光の輝度のピーク角度は、約 74° である。ここで、図 3-5 に示す光線(以下、主光線と呼ぶ)が導光板から 74° の角度で出射する光とすると、導光板表面への入射角度 θ_1 は 37.5° 、プリズムシート裏面への入射角度 θ_2 は 74° である。この光線のプリズムシートの基材内部での屈折角度 θ_3 は 37.5° 、プリズム内部での屈折角度 θ_4 は 36.9° となる。この光がプリズムの光源側の表面 S_1 に直接入射すると、正面方向(z 軸方向)には向わなくなるため照明光として有効に利用できなくなる。このためプリズム表面 S_1 の底角 α は、主光線が当たらない角度、すなわち 53.1° より大きくする必要がある。本検討では 5° 程度の尤度となる 58° を選択した。一方、光源とは反対側のプリズム表面 S_2 の底角 β は、主光線のプリズム表面 S_2 への入射角度 θ_5 が 32.1° となる 69° とした。この角度は、プリズムと空気との界面におけるブリュースター角(32°)とほぼ一致する角度であり、p 偏光の透過率をほぼ 100%にすることができる角度である。このように、プリズムの断面形状は2つの底角が異なる非対称な形状とした。

図 3-6 に例示する通り、主光線の各界面における透過率は p 偏光が s 偏光より高く、特にプリズム表面 S_2 への入射角度は、p 偏光の透過率が 100%となるブリュースター角に近い角度である。このため、プリズムシートから出射する光は p 偏光の量と割合が大きい光となる。

さらに p 偏光の量を増やす施策として、プリズムシートの裏面にプリズムシートの基材よりも屈折率が高い膜を一層設ける構造を考案した。図 3-8 はプリズムシートの断面構造を示す概略図である。プリズムシート裏面の屈折率が高くなると、空気との界面におけるブリュースター角はプリズムシート裏面への主光線の入射角度 $\theta_2 = 74^\circ$ に近づく。このため p 偏光の透過率はより高く、s 偏光の透過率はより低くなり、この界面を通過する p 偏光の量と割合が増加する。しかし、プリズムシートの基材自体を高屈折率な材料にすることは、コストや生産性の面で現実的ではない。そこで、図 3-8 に示すとおり、基材の裏面側に高屈折率な薄膜を形成することを検討した。高屈折率膜は適切な膜厚を選択することで、空気と高屈折率膜との界面や、高屈折率膜と基材との界面での反射や透過による光学干渉により p 偏光の透過率は向上し、s 偏光の透過率は低下するため、p 偏光の量と割合を大きくすることが可能になる。

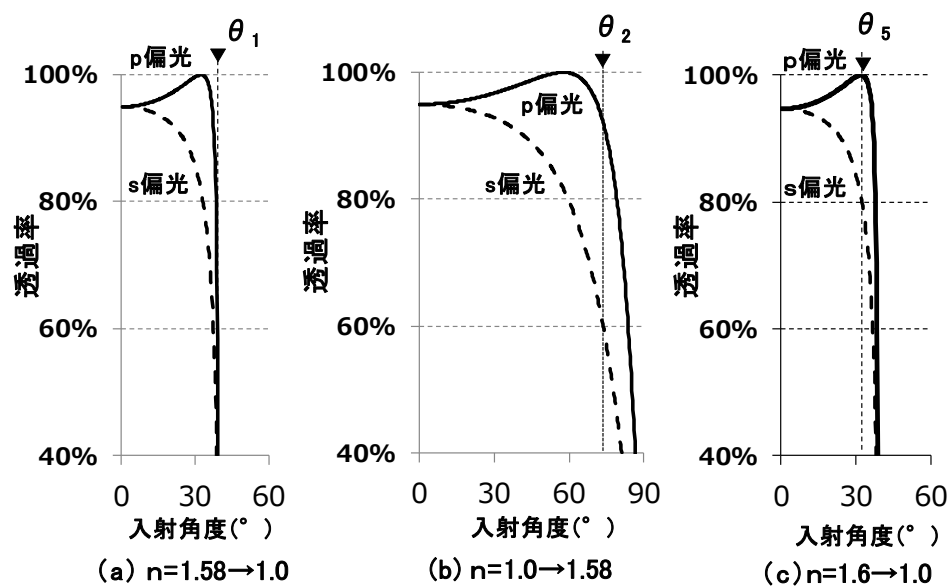


図 3-6 バックライト部材各界面での透過率の入射角度依存性(計算値)

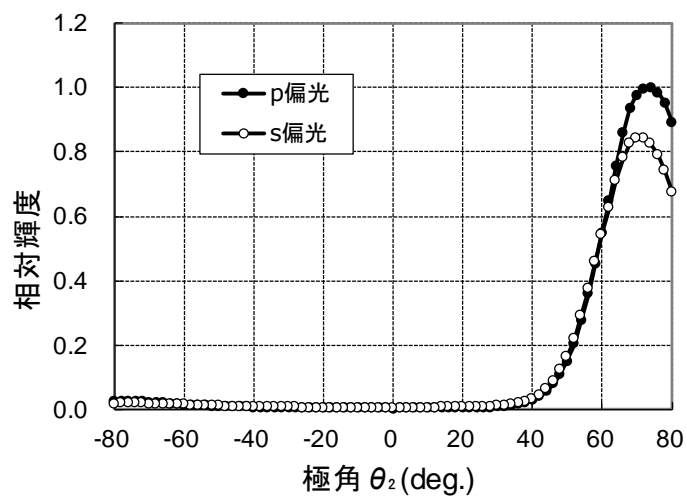


図 3-7 導光板出射光の方位角 $\phi = 90^\circ$ におけるp偏光及びs偏光の輝度の角度依存性

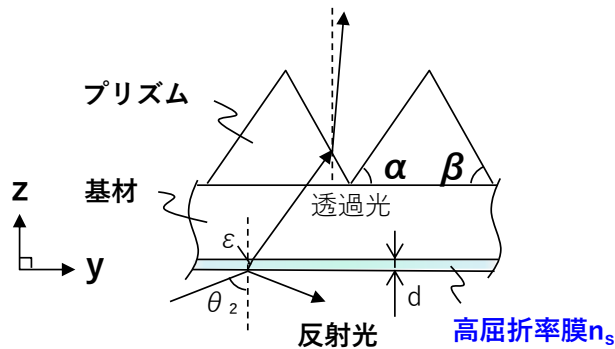


図 3-8 プリズムシートの断面概略図

具体的には、プリズムシート裏面のp偏光の透過率が高くなるように高屈折率膜の膜厚 d を式(3-3)を満たす条件にする。ここで、 λ は光の波長、 n_s は高屈折率膜の屈折率、 ε は高屈折率膜内の光の進行角度、 m は整数とする。

$$d = \lambda / (4 \cdot n_s \cdot \cos \varepsilon) \cdot (2m+1) \quad (3-3)$$

波長 λ は比視感度が高い 550nm を考慮すれば良い。また、膜厚 d は m の値を 1 以上の整数として得られる値としても原理上は良いが、膜厚 d を大きくすると生産性の低下や膜応力によるシートの反りなど信頼性への影響が懸念されるため、本検討では $m=0$ で算出される値を膜厚 d として選択した。

図 3-9 にプリズムシートの裏面に入射角度 $\theta_2=74^\circ$ で入射する光の p 偏光の透過率及び p 偏光度と高屈折率膜の屈折率 n_s との関係を示す。この図は、高屈折率膜の膜厚 d を式(3-3)から求められる値とし、マクスウェルの方程式から導き出される特性マトリクスを用いた光学干渉を考慮した計算¹¹⁾の結果である。p 偏光の透過率が増加すれば p 偏光輝度が向上する。さらに、s 偏光の反射が増加して、その透過率が低下すれば p 偏光度が高くなる。計算上、高屈折率膜の屈折率を高くすると p 偏光の透過率は向上し、例えば、二酸化チタンや硫化亜鉛であれば実現可能な屈折率 $n_s=2.40$ の場合、p 偏光の透過率は 99.9%、p 偏光度が 60.1%となる。しかし、実用化に向けては、膜厚変動に対する感度や膜応力によるシートの反りなど、生産性や信頼性を考慮した選択が望ましい。なお、本評価では 3.5 節で述べるとおり、高屈折率膜として屈折率 $n_s=1.9$ の材料を用いた。

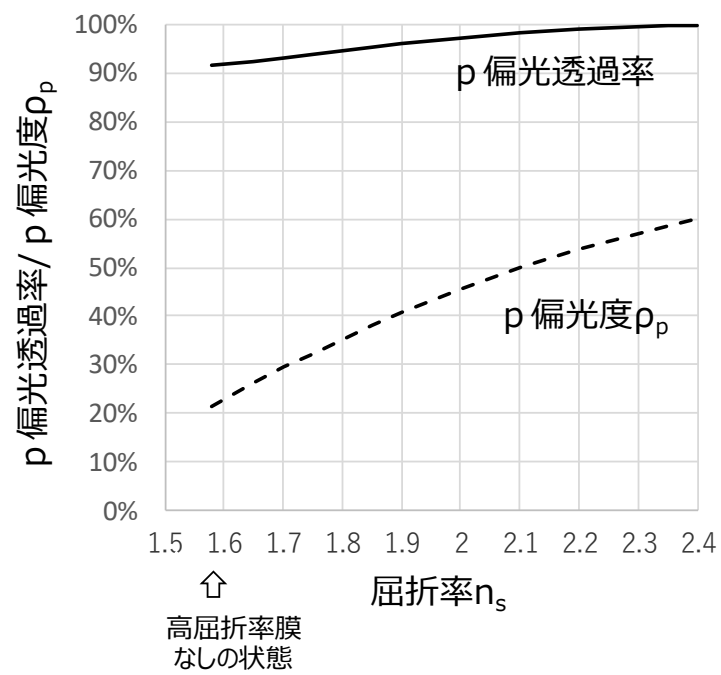


図 3-9 高屈折率膜の屈折率 n_s とp偏光透過率及びp偏光度 ρ_p の関係(計算値)

3. 4. 3 指向性拡散シートの構造

図 3-10 は指向性拡散シートの概略構成を示す断面図である。本開発で検討した指向性拡散シートは、基材と基材上に配置したマイクロレンズ及びマイクロレンズ表面を覆う平坦化膜から構成される。次節で述べるとおり、プリズムシート通過後の光は、p 偏光輝度のピーク角度が正面方向から約 10° ずれているため、指向性拡散シートはこれを通過する光の偏光状態を維持しつつ、入射角度 θ_0 が約 10° である主光線の進行方向を正面方向へ補正する機能を備える必要がある。このため、マイクロレンズは斜め方向に進む光の進行方向を正面方向に補正できるように、図示のように偏心し、平均底角 γ が約 17° となる傾斜面を備える。平坦化膜は、マイクロレンズ(屈折率 1.56)よりも屈折率が低い透明体(屈折率 1.40)で構成し、マイクロレンズのピッチや大きさは、プリズムシートとのモアレを抑制するためランダムとしている。また、プリズムシートを通過後のp偏光成分が多い光の偏光状態を維持するため、その材質はプリズムシートと同様、光学的に等方なものとする。

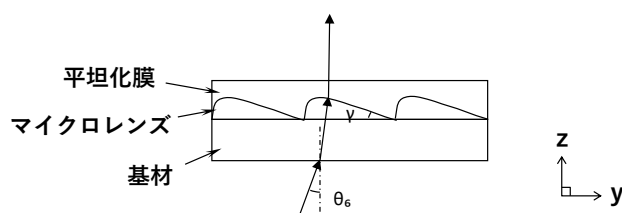


図 3-10 指向性拡散シートの断面図

3.5 評価結果

以下、評価結果について述べる。初めにプリズムシートの作用と効果を確認するため、導光板上にプリズムシートのみを配置した場合の結果を示し、その後、プリズムシート及び指向性拡散シートを備える最終形態のバックライトの評価結果について述べる。

3.5.1 プリズムシート通過時の特性

図 3-11 及び図 3-12 に導光板上にプリズムシートのみを配置した状態の p 偏光輝度と s 偏光輝度の角度依存性(方位角 $\phi=90^\circ$)を示す。図 3-11 はプリズムシート裏面に高屈折率膜が無い条件、図 3-12 は高屈折率膜がある条件の結果であり、比較のため両図ともに縦軸は、プリズムシート裏面に高屈折率膜が無い条件における s 偏光の正面輝度(極角 0°)で規格化した相対輝度を示す。なお、本評価では高屈折率膜として酸化亜鉛 93%+酸化アルミ 7%の膜を用いた。その屈折率 n_s は 1.9、膜厚 d は 84nm である。両図から明らかなとおり、プリズムシート裏面の高屈折率膜の有無に関わらず、プリズムシート通過後の輝度は s 偏光と比較して p 偏光が高くなった。p 偏光輝度のピーク角度はいずれも約 10° であり、この角度における p 偏光輝度は s 偏光輝度と比較して、高屈折率膜が無い条件で 1.9 倍、高屈折率膜が有る条件で 2.5 倍となった。この差は主に高屈折率膜が有る場合、プリズムシート裏面の s 偏光の透過率が低くなったためである。なお、ピーク輝度角度における p 偏光輝度は、高屈折率膜を設けることで約 4%上昇した。

図 3-13 に導光板の上にプリズムシートのみを配置した状態における p 偏光度 ρ_p の角度依存性(方位角 $\phi=90^\circ$)を示す。同図にはプリズムシート裏面に高屈折率膜が有る条件と無い条件を併記した。高屈折率膜が有ることで p 偏光度は最大で 50%を超えている。また、高屈折率膜が無い場合でも p 偏光度は 35%に達している。高屈折率膜が有ることで p 偏光度は大幅に向上しているが、これは主としてプリズムシート裏面における s 偏光の反射率が増加して、s 偏光輝度が低下したことが効いている。このため、特に高屈折率膜が有る場合は、プリズムシート裏面で反射した s 偏光をその偏光状態を解消し、再び照明光として利用することができれば、p 偏光輝度をさら向上できると考えられる。

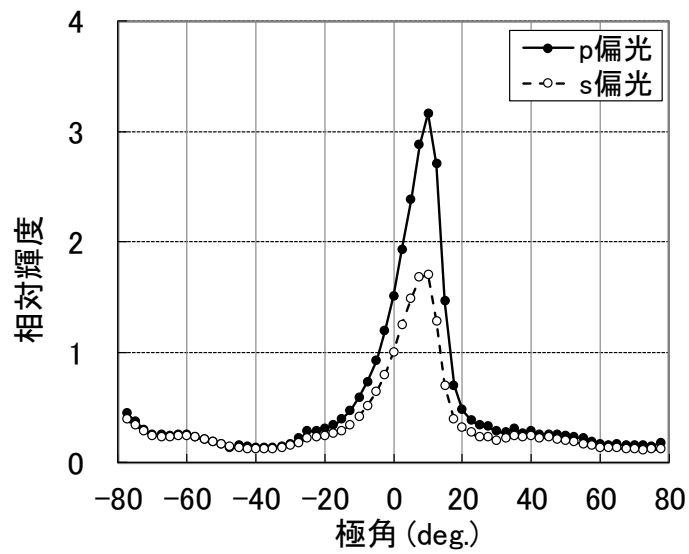


図 3-11 プリズムシート通過後の p 偏光輝度及び s 偏光輝度の角度依存性
(高屈折率膜-無, 方位角 $\phi = 90^\circ$)

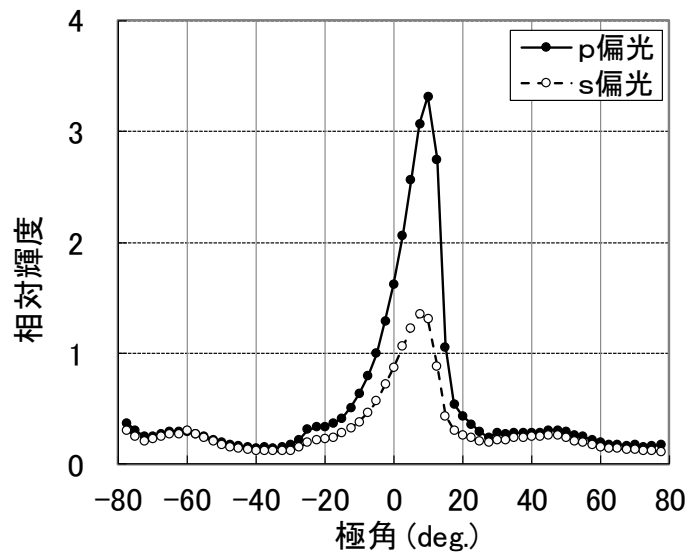


図 3-12 プリズムシート通過後の p 偏光輝度及び s 偏光輝度の角度依存性
(高屈折率膜-有, 方位角 $\phi = 90^\circ$)

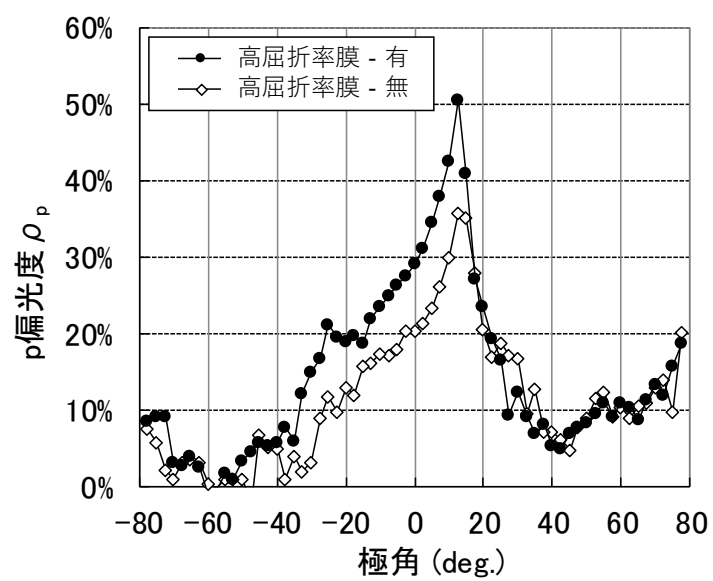


図 3-13 プリズムシート通過後の p 偏光度 ρ_p の角度依存性 (方位角 $\phi = 90^\circ$)

3. 5. 2 バックライトの性能

次に、導光板上にプリズムシートと指向性拡散シートを配置して、最終形態のバックライトとした場合の評価結果について述べる。図 3-14 及び図 3-15 は、本開発のバックライトの p 偏光輝度の角度依存性を示す。図 3-14 は方位角 $\phi = 90^\circ$ における角度依存性、図 3-15 は方位角 $\phi = 0^\circ$ における角度依存性を示す。両図共にプリズムシートの裏面に高屈折率膜が有る条件と無い条件に加え、比較のため、従来の方式のバックライトに同じ電力を投入した時のデータを併記した。また、両図の縦軸は共に従来のバックライトの正面輝度(極角 0°)で規格化した相対輝度である。ここで、比較に用いた従来のバックライトは、導光板の上に拡散シート 1 枚とプリズムシート 2 枚をこの順に配置したものである(図 3-1 に例示)。図 3-11 及び図 3-12 に示した通り、本開発品は方位角 $\phi = 90^\circ$ 方向においてプリズムシート通過後のピーク輝度の角度が正面方向に対し、 $+10^\circ$ 程度ずれていた。しかし、図 3-14 に示すとおり、指向性拡散シートの作用により、そのピーク輝度の角度は -2° とほぼ正面方向に補正できた。また、従来の方式と比較して、正面方向の p 偏光輝度は高屈折率膜が無い条件で 30%, 高屈折率膜が有る条件で 34%向上しており、さらに方位角 $\phi = 90^\circ$ 方向では、ほぼ全ての極角範囲で従来の方式よりも高い p 偏光輝度が得られた。一方、方位角 $\phi = 0^\circ$ 方向では、正面方向(極角 0°)を中心に、ほぼ対称の輝度分布となっており、極角が $\pm 15^\circ$ より大きい範囲では、従来の方式よりも p 偏光輝度が低くなった。これは本開発品の指向性拡散シートが、方位角 $\phi = 0^\circ$ 方向に対し、光を拡散する能力が低いことが一因と考えられる。

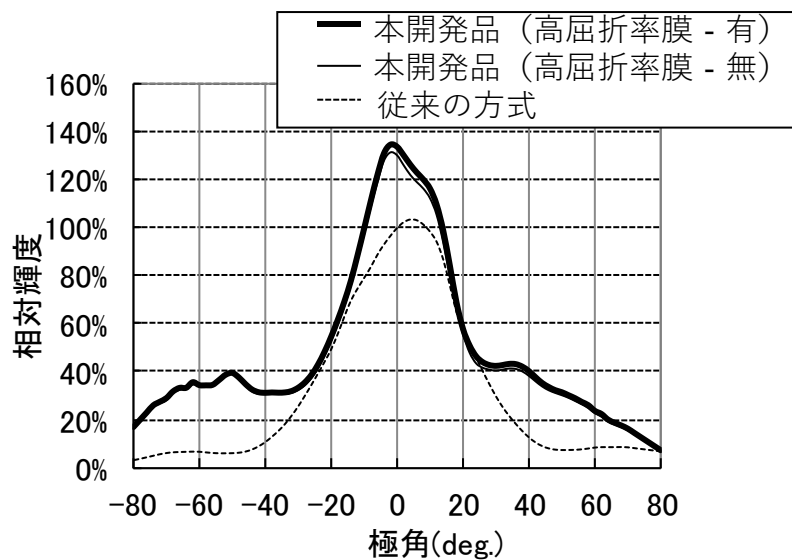


図 3-14 バックライト出射光の p 偏光輝度の角度依存性(方位角 $\phi = 90^\circ$)

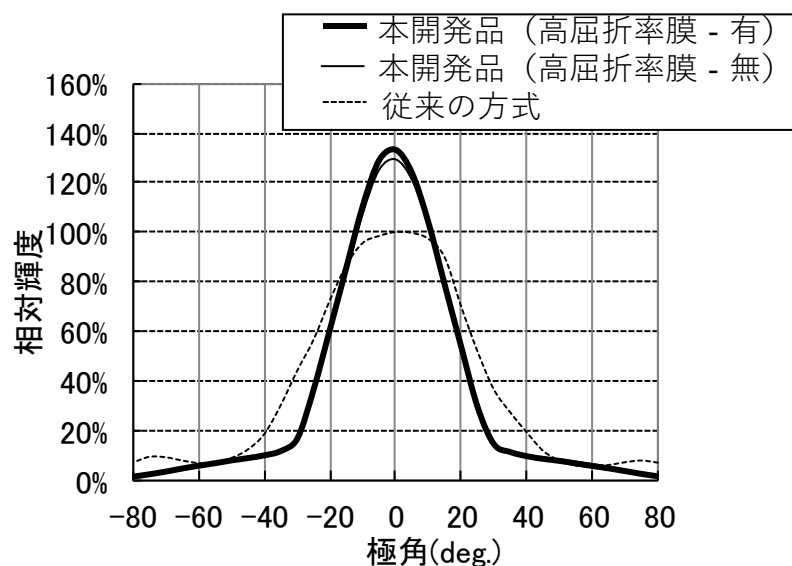


図 3-15 バックライト出射光の p 偏光輝度の角度依存性(方位角 $\phi = 0^\circ$)

表 3-1 にバックライトの仕様の比較を示す。正面方向の p 偏光輝度は従来の方式に対し、高屈折率膜が有る場合に 1.34 倍 (34% 向上) となった。この際、従来の方式では p 偏光度が 0.3% とほぼランダム偏光だったのに対し、本開発品の p 偏光度は 37% であった。なお、輝度の半値角については、従来の方式と比較すると、方位角 $\phi = 90^\circ$ の方向で 4° 、方位角 $\phi = 0^\circ$ の方向で 16° 狭くなった。ここで、s 偏光を含む全ての光 (全偏光) に対する正面輝度は、高屈折率膜を有する本開発品では従来の方式より 5% 低くなったが、p 偏光輝度については逆に 34% 高くなった。このため、特定の偏光輝度 (p 偏光輝度) の向上は、バックライトの配光特性の影響だけでなく、屈折界面において p 偏光の透過率が高くなることを積極的に利用する本開発のコンセプトが有効であることを示していると考えられる。

また、従来の方式では、光学部材の数が反射シート、導光板、拡散シート及び 2 枚のプリズムシートの計 5 つである。これに対し、本開発品では、導光板から出射する p 偏光成分の多い光を有効利用するため、導光板の直上には拡散シートを配置せず、さらに光の進行方向を補正する機能を備える指向性拡散シートを採用することで光学部材の数が計 4 つとなった。光学部材の数が減ること、本開発品は従来の方式と比較して、薄型化や低コスト化に有利になると考えられる。

なお、上述のとおり、本評価に用いたバックライトの有効照明領域は $66\text{mm} \times 37\text{mm}$ (対角 2.98 インチ) であり、評価は主にその中心点で行った。有効照明領域の面内輝度分布については、従来のバックライトと同様、設計事項として技術的に対処可能である。ここで、導光板から出射する光は p 偏光成分が多いため、導光板内に留まり導波し続ける光は s 偏光成分が多くなり光源から遠い位置では p 偏光度 ρ_p が低下する可能性が考えられる。このため、有効照明領域の中心から光源 (LED) 側に 20 mm 及びその反対側に 20 mm 離れた位置で p 偏光度 ρ_p を測定した。その結果、p 偏光度 ρ_p の差は 2% 程度であり、どちらか一方の側が高くなる等の特別な傾向は見られなかった。したがって少なくとも今回評価に用いたような小型サイズのバックライトであれば原理上の致命的な課題は無いと考えられる。なお、サイズが大きくなる場合には、導光板から出射する光の偏光度が位置に拠らず一定となる工夫を意図的に入れることが有効であると考えられる。例えば、導光板内を導波する光の偏光状態を積極的に変化させるため、複屈折性を有する材質で導光板を形成する、もしくは、導光板に微細な構造を設けて全反射の際の位相のずれにより偏光状態を変化させる¹²⁾などのアイデアは効果が期待できる。

表 3-1 バックライト仕様の比較

	本開発品		従来の方式
	高屈折率膜有	高屈折率膜無	
光学特性	正面輝度 (p 偏光)	1.34	1.00
	p 偏光度 ($\theta = 0^\circ$)	37%	0.3%
	輝度半値角 (p 偏光)	$-16^\circ \sim 18^\circ$	$-18^\circ \sim 20^\circ$
	方位角 $\phi = 90^\circ$		
	輝度半値角 (p 偏光)	$-18^\circ \sim 18^\circ$	$-26^\circ \sim 26^\circ$
	方位角 $\phi = 0^\circ$		
	正面輝度 (全偏光)	0.95	1.00
光学部材数	4	4	5

3.5.3 他方式との比較

液晶パネルの裏面に備える偏光板での吸収損失を抑制する方法として、液晶パネルとバックライトとの間に反射型偏光フィルムを設ける方法がある²⁾⁻³⁾。この方法は LCD の正面輝度を 1.35 倍程度に向上することができる。本開発品はこれに匹敵する 1.34 倍の正面輝度向上の効果が得られる。輝度の半値角は狭くなるが、反射型偏光フィルムのような追加の部材が不要であり、バックライト自体もより少ない光学部材で構成できるという利点がある。また、反射型偏光フィルムを用いない方法として、導光板に偏光ビームスプリッタとマイクロプリズムを備えたバックライト⁴⁾、導光板に等方性部材と非等方性部材から成る微細な界面を形成し、全反射を利用して s 偏光を積極的に取りだすように構成したバックライト⁵⁾⁻⁷⁾など、特殊な部材や特別な構造を備えて高偏光度な光を出射するバックライトの検討が種々行われている。本開発品は、従来のバックライトと同様な構成部材を用い、その屈折界面において p 偏光の透過率が s 偏光よりも高くなることを積極的に利用するものであり、特殊な部材や特別な構造を必要としない。このため、既存の生産設備で製造が可能であり、薄さやコストや面で他の方式に対して優位性があると考えられる。

3.6 性能改善の検討

3.6.1 改良の余地について

本研究によって、導光板の表面、プリズムシートの裏面及びプリズムシートの表側の面といった各界面で p 偏光の透過率が s 偏光よりも高くなることを有効利用することで、特定の偏光 (p 偏光) をより多く出射する偏光バックライトを実現できることを確認した。この結果、液晶ディスプレイに本バックライトを採用し、液晶パネル裏面に備える偏光板の透過軸を p 偏光の偏光軸と一致させれば、同じ輝度であればバックライトの消費電力を約 30% 削減できる見通しを得た。但し、本開発品には更なる低消費電力化に向け、以下の 2 点を着目点とする改良の余地があると考えられる。

① 方位角 $\phi = 90^\circ$ 方向において、表示装置としてはあまり必要がない角度範囲 ($\theta > 40^\circ$)

の輝度が高い (表示に有効利用されない光が多い)。

② s 偏光を含む全ての光 (全偏光) に対する正面輝度は従来の方式と同等であり、特に高屈折率膜を設けた場合は、やや低くなる。

①については、図 3-11 と図 3-12 に示す通り、指向性拡散シートが無い状態、すなわち、プリズムシート通過時には極角 $\theta = 40^\circ$ 以上の角度範囲の不要光が特に大きくないことから、指向性拡散シートを構成するマイクロレンズの形状などの最適化を進めることで改善できる可能性がある。

②はプリズムシート裏面の s 偏光の反射率が高く、透過率が低いことが主因と考えられる。例えば、高屈折率膜の屈折率 n_s を本評価で用いた 1.9 とすると、主光線の s 偏光に対する透過率は約 40% に留まる。対策としては 2 つのアプローチがある。一つは、導光板から出射する光の p 偏光度をさらに向上して、透過率が低い s 偏光の出射自体を減らすことである。もう 1 つはプリズムシート裏面で反射した s 偏光をその偏光状態を解消し、再び照明光として利用できる構造を構築することである。

3. 6. 2 プリズムシートの基材の改良

本開発の偏光バックライトでは、プリズムシートの基材として光学的に等方なフィルムを用いることが望ましい。これはプリズムシートを通過する光の偏光状態を維持することで、特定の偏光がより多く含まれる照明光を得るためである。本評価では基材として無延伸のポリカーボネートフィルムを用いた。なお、延伸フィルムであっても一軸延伸であれば、その遅相軸の角度を方位角 $\phi = 0^\circ$ もしくは 90° となるように配置すれば偏光状態の変化は抑制できる。しかし、これらのフィルムは比較的高価である。このため、二軸延伸したポリエチレンテレフタレート(PET)フィルムのように強度が高く、より安価な基材を用いることができれば工業的な優位性は高まる。そこでプリズムシートの基材として PET フィルムを用いる場合の条件について検討した。

図 3-16 と図 3-17 に導光板出射時の偏光を考慮しない輝度の角度特性を示す。図 3-16 は等輝度線図(等輝度を明暗で表示)であり、全方位における極角 $0 \sim 80^\circ$ の範囲の輝度分布を最大輝度で規格化した相対輝度を示したものである。また、図 3-17 は方位角 $\phi = 90^\circ$ における輝度の角度依存性を示す。導光板からの出射光は、方位角 $\phi = 90^\circ$ 、極角 $\theta = 72^\circ$ 、すなわち yz 平面(xyz 軸については、図 3-4 参照)内で輝度が最大となる。また、方位角 $\phi = 70^\circ \sim 110^\circ$ 、極角 $\theta = 65^\circ \sim 80^\circ$ の範囲で高輝度(相対輝度で 75%以上)となっているため、この角度範囲を特に考慮することにする。

ここで、プリズムシートの基材として厚さ $50 \mu\text{m}$ 、主屈折率がそれぞれ $n_x=1.68$ 、 $n_y=1.63$ 、 $n_z=1.47$ である二軸性の PET フィルムを想定する。二軸性の透明体では、その複屈折の影響を一軸性の透明体のように単純に考えることができない。そこで、二軸性の PET フィルムに全方位から p 偏光(ここでは、 yz 面内、即ち、方位角 $90^\circ - 270^\circ$ 方向に振動方向を有する直線偏光)が入射したときに、PET フィルムを透過した光の偏光状態がどのように変化するのかを偏光変換行列に基づく計算手法を備えた光学シミュレータ(LCD Master, Shintech 社製)を用いて計算した。具体的には、PET フィルムを通過する光について p 偏光成分の割合(p 偏光透過率)を計算し、評価した。

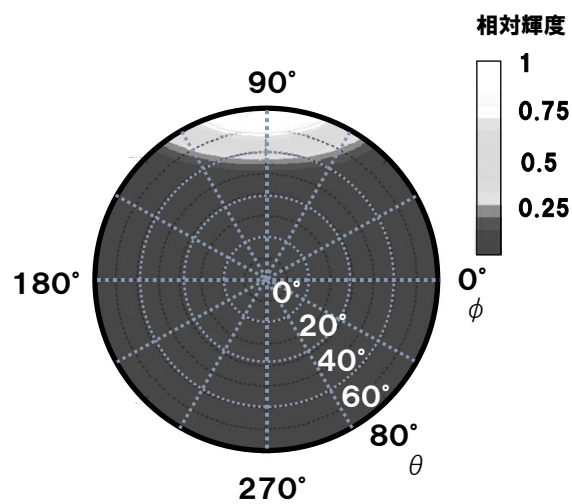


図 3-16 導光板出射時の輝度の角度特性(全方位)

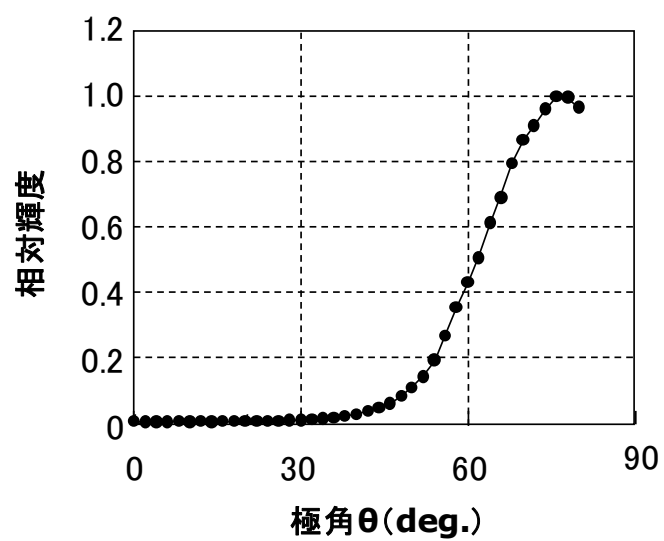
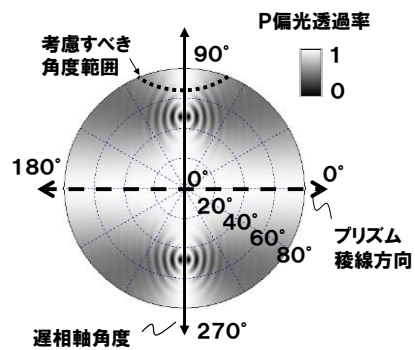


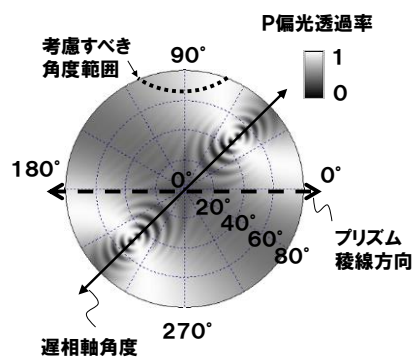
図 3-17 導光板出射時の輝度の角度特性(方位角 $\phi = 90^\circ$)

図 3-18 及び図 3-19 に計算結果を示す。図 3-18 は上記 PET フィルムに p 偏光を入射し、通過したときの p 偏光成分の割合 (p 偏光透過率) を示す等透過率線図 (等透過率を明暗で表示) である。図 3-18 (a)、(b)、(c) はそれぞれ PET フィルムの遅相軸を $\phi = 90^\circ$ 、 45° 、 0° とした場合の計算結果である。また、考慮すべき角度範囲 (方位角 $\phi = 70^\circ \sim 110^\circ$ 、極角 $\theta = 65^\circ \sim 80^\circ$) における p 偏光透過率の状況の一例として、図 3-19 に極角 $\theta = 76^\circ$ における、p 偏光透過率の方位角 ϕ 依存性を示す。比較のため、図 3-19 には、 $\phi = 90^\circ$ 、 45° 、 0° の計算結果を併記した。

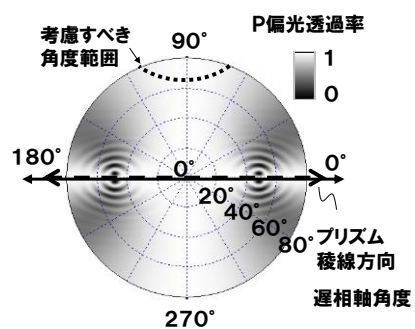
図 3-18 及び図 3-19 が示す通り、遅相軸を $\phi = 90^\circ$ とした場合、p 偏光透過率は方位角 $\phi = 90^\circ$ の軸上以外の考慮すべき角度範囲 (方位角 $\phi = 70^\circ \sim 110^\circ$ 、極角 $\theta = 65^\circ \sim 80^\circ$) において p 偏光透過率の低下が見られる。また、遅相軸を $\phi = 45^\circ$ とした場合、p 偏光透過率は特に方位角 $\phi = 80^\circ \sim 110^\circ$ 辺りの領域で低下している。一方、遅相軸を $\phi = 0^\circ$ とした場合は考慮すべき角度範囲での p 偏光透過率の低下が小さい。このため、プリズムシートの基材として二軸性のフィルムを使う場合、その遅相軸を方位角 $\phi = 0^\circ$ 、すなわちプリズムの稜線と平行な方向とすれば、等方性のフィルムを用いる場合に匹敵する性能が期待できる。



(a) 遅相軸 $\phi = 90^\circ$



(b) 遅相軸 $\phi = 45^\circ$



(c) 遅相軸 $\phi = 0^\circ$

図 3-18 基材(PET フィルム)の p 偏光透過率分布(計算値)

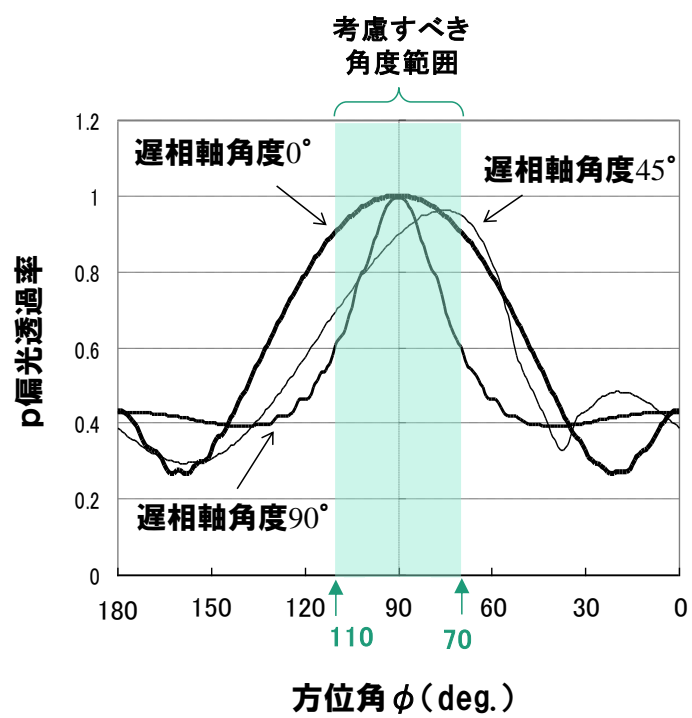


図 3-19 基材(PET フィルム)の p 偏光透過率分布(計算値)

3.7 まとめ

液晶ディスプレイの低消費電力化のため、特定の直線偏光をより多く出射する偏光バックライトを検討した。この際、複雑な構造や特殊な部材を新たに導入することなく、既存の構成部材の各界面における屈折において、p 偏光の透過率が s 偏光より高くなることを積極的に利用することを基本コンセプトとした。具体的には、以下の3項目を備えるバックライトを検討した。

①プリズムシートはプリズム面を表側の面に備え、主光線がプリズム面に対しブリュースター角で入射するように非対称な断面形状のプリズムを採用する。

②プリムシートの裏面に p 偏光の透過率が高くなる条件で高屈折率膜を設ける。

③プリズムシートと指向性拡散シートの基材として、通過する光の偏光状態を維持するため、光学的に等方なフィルムを用いる。

①～③の要件を備えるバックライトを試作、評価した結果、従来の方式と比較して、p 偏光の正面輝度が 1.34 倍に向上することを確認した。この際、バックライトからの出射光は p 偏光度が 37% の部分偏光となっており、コンセプトどおりに p 偏光の割合が多い出射光を得られることを証明できた。このバックライトを液晶ディスプレイに採用した場合、反射型偏光フィルムを適用した場合（正面輝度 1.35 倍）に匹敵する正面輝度の向上効果（1.34 倍）が得られる。換言すると、反射型偏光フィルムを適用しなくても、バックライトの電力を約 30% 低減できる見通しが得られた。また、本開発のバックライトは、特殊な部材や特別な構造を必要としないため、既存の生産設備で製造が可能であり、より少ない部材で実現できることから、薄さやコストの面で優位性があると考えられる。

なお、反射型偏光フィルムを用いるバックライトと比較すると、本開発のバックライトは輝度分布（半値角）が狭い。このため、正面方向の p 偏光輝度を維持したまま、半値角を拡大することで製品への適用が進むと考えられる。

参考文献

- 1) 足立昌哉、西澤重喜、島崎勝輔、「屈折界面において p 偏光透過率が高くなることを有効活用した高効率バックライト」、照明学会誌、第 104 巻 2 号、82-89 (2020)。
- 2) M. F. Weber, C. A. Stover, L. R. Gilbert, T. J. Nevitt and A. J. Ouderkirk, “Giant Birefringent Optics in Multilayer Polymer Mirrors”, Science **287**(5462), 2451-2456 (2000).
- 3) D. J. Broer, J. Lub and G. N. Mol, “Wide-band reflective polarizers from cholesteric polymer networks with a pitch gradient”, Nature **378**, 467-469 (1995).
- 4) Z. Pang and L. Li, “Novel High Efficiency Polarizing Backlight System with a Polarizing Beam Splitter”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **30**, 916-919 (1999)
- 5) H. J.B. Jagt, H. J. Cornelissen, D. J. Broer and C. W. M. Bastiaansen, “Micro-structured Polymeric Linearly Polarized Light Emitting Lightguide for LCD illumination”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **33**, 1236-1239 (2002).
- 6) H. J. Cornelissen, H. P. M. Huck, D. J. Broer, S. J. Picken, C. W. M. Bastiaansen, E. Erdhuisen and N. Massskant, “Polarized Light LCD Backlight Based on Liquid Crystalline Polymer Film: A New Manufacturing Process”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **35**, 1181-1181 (2004).
- 7) S. Hwang, Y. Kim, Y. Kim, S. Nam and S. Lee “Highly Efficient Backlight Unit with a Polarization-Separating Anisotropic Layer”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **38**, 476-479 (2007).
- 8) Z. Luo, Y.W. Cheng and S.T. Wu, “Enhancing LCD Optical Efficiency with a Linearly Polarized Backlight and Polarization-preserving Light Guide Plate”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **45**, 836-838 (2014).
- 9) M. Adachi, Y. Shiraishi, S. Nishizawa, Y. Ogawa and N. Ishihara, “High Efficiency Backlight Effectively Using P-polarized Light”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **42**, 1423-1426 (2011)
- 10) 北村孝司、「2-2 電子ペーパーによる省電力化技術」、映像情報メディア学会誌、**63**(4)、416 (2009)。
- 11) 中村正行、「Excel VBAによる光学多層膜のシミュレーション技術と最適設計」、技術情報協会、(2002)。
- 12) 足立昌哉、杉田辰哉、「照明装置および液晶表示装置」、特許第 5055398 号、(2012.8.3)。

第4章 有機 EL ディスプレイの光利用効率の向上

4.1 はじめに

有機 EL ディスプレイは、液晶ディスプレイに代表される非発光型のディスプレイとは異なり、自発光型であるため、バックライト等の補助光源が不要であり、薄型、軽量、広視野角、高速表示といった特長を有する。さらに、フレキシブル基板を用いることでディスプレイ自体をフレキシブル化して、丸めたり、折り畳むことが可能になる。このため、持ち運ぶときは小さく見るときは大きく(大画面)といった使い方が可能になり、モバイル機器への搭載が益々進むと予想される。このように今後の市場拡大が予想される有機 EL ディスプレイには、光学的な面で二つの改善すべき課題がある。

一つ目の課題は、有機 EL 素子の発光層から出射した光を素子外部へ取り出す効率(以下、光取り出し効率)が低いことである。これは発光層が外界(空気)よりも高い屈折率を有し、発光層で発生した光の一部が空気との界面などで全反射して素子内部に留まり、外部(観察者側)に取り出せないためである。この対策として、発光層から出射した光を観察者側へ反射するためのメサ構造¹⁾や発光層から出射する光と空気界面との角度が小さくなるように半球状のレンズアレイを設ける構造²⁾の検討がなされている。

二つ目の課題は、明るい環境において発光層裏面に設けられた反射層(反射電極)で外光が反射して、黒表示が十分に暗くならないために生じるコントラスト比(画質)の低下である。この課題に対しては偏光板と1/4波長板から構成される、いわゆる円偏光板を画面上に配置することで外光反射を抑制する構造³⁾が広く製品に適用されている。また、反射層と発光層との間に屈折率が異なる薄膜を形成し、光の干渉効果によって反射を抑制する技術が実用化されている⁴⁾⁵⁾。これらの方法はいずれも外光だけでなく発光層から出射した光の半分以上を吸収するため、光利用効率が50%以下に低下するという課題を有する。

また、有機 EL 素子の発光材料については加法混色の三原色のうち、赤色と緑色については高い発光効率が得られる三重項発光材料(燐光材料)が実用化されているが、青色については、特に発光寿命の面で実用化可能な三重項材料が今のところ見出されていない。このため、現状は青色の発光材料として、発光効率が低い一重項発光材料(蛍光材料)が用いられている。また、青色の発光効率の低さを補うため、青色画素の面積を他の色より大きくするなど、画素のレイアウト上の工夫が行われる場合がある。

本章では、発光効率が低い青色光の偏光板での吸収損失低減により、有機 EL ディスプレイを低消費電力化する技術について述べる。具体的には、円偏光板と発光層との間に青色に選択反射

の波長帯域を有するコレステリック液晶層を配置することで、従来、偏光板で吸収され損失となっていた青色光を、偏光板で吸収される前にコレステリック液晶層で反射し、再利用することで光利用効率を向上する構造(光リサイクル構造)⁶⁾⁷⁾について述べる。

4.2 有機 EL ディスプレイの低電力化に向けた課題

4.2.1 有機 EL 素子の発光原理と効率

第1章で述べたとおり、有機 EL 素子は陽極と陰極間に直流電圧を印加すると電流が流れ、陽極からは正孔が、陰極からは電子が注入され、発光層へ注入された両キャリアが再結合して発光に至る。ここで、正孔と電子の再結合効率を γ 、キャリアの再結合による励起子の生成効率を η_r 、内部発光効率(内部量子効率)を ϕ_p 、光取り出し効率を η_{out} とすると、外部発光効率(外部量子効率) η_{ext} は次式で表すことができる。また、図 4-1 に蛍光材料の発光効率の説明図を示す。

$$\eta_{ext} \propto \gamma \times \eta_r \times \phi_p \times \eta_{out} \quad (4-1)$$

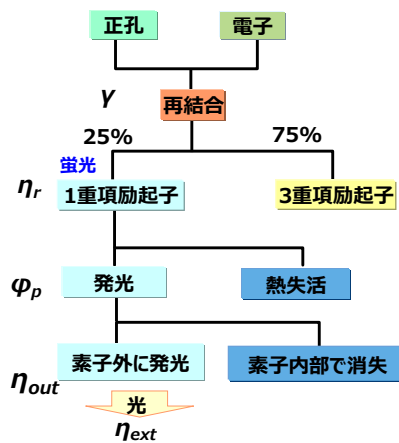


図 4-1 蛍光材料の発光効率

再結合効率 γ は、有機 EL 素子を構成する各層のキャリア移動度や膜厚、注入効率などを最適化することで高めることができる。励起子生成効率 η_r は一重項励起子と三重項励起子の生成確率が 1:3 であるため、蛍光材料では発光に寄与する励起子生成効率 η_r が一般に 25% 程度となる。さらに発光層から出射する光は、発光層が外界(空気)よりも高い屈折率を有するため、その一部が全反射などにより素子内部に留まり損失となるため、外部に取り出すことができる光は 20~30% である⁸⁾。このため、実用的な寿命を示す三重項材料が見いだされていない青色の有機 EL 素子では仮に内部発光効率 ϕ_p が 100% であってもその外部発光効率 η_{ext} は、5.0~7.5% に留まる。

4. 2. 2 外光反射抑制技術と光利用効率の低下

図 4-2 に有機 EL ディスプレイの断面構造の概略図を示す。有機 EL ディスプレイは液晶ディスプレイとは異なり、画像の形成自体に偏光板を用いる必要はない。しかし、反射電極が反射率の高い金属膜で構成されるため、明るい環境では外光の反射が多くなり、画像のコントラスト比が低下する。このため、特にモバイル機器に搭載される有機 EL ディスプレイでは外光反射の抑制のため、画面の表面側に偏光板と1/4 波長板から構成される円偏光板を備える。

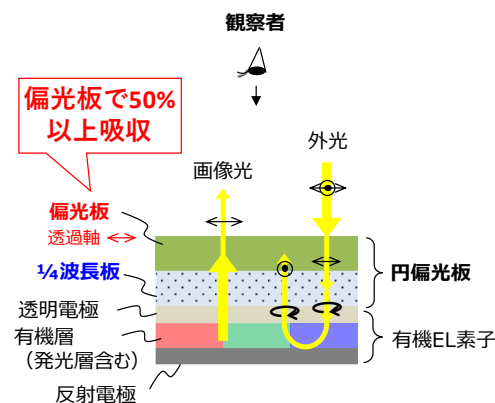


図 4-2 有機 EL ディスプレイの断面構造図

図 4-3 は円偏光板の機能説明図である。円偏光板は、ランダム偏光から直線偏光を取り出すことができる偏光板(偏光子)と 1/4 波長板を組み合わせたものである。外光が有機 EL ディスプレイに入射すると、最初に偏光板によって特定の振動方向を有する直線偏光が吸収され、これと直交する振動方向の直線偏光が透過する(ここでは、透過軸の角度 ξ)。偏光板を透過した直線偏光は 1/4 波長板(遅相軸の角度 $\xi - 45^\circ$)に入射する。1/4 波長板に入射した直線偏光は、その作用で円偏光(ここでは右回り円偏光)に変換される。この光は反射電極で反射して再び 1/4 波長板に入射するが、反射の際、光の進行方向が変わることで円偏光の回転方向が逆向きになる(左回りの円偏光になる)。この光は 1/4 波長板を通過する際、直線偏光に変換されて再び偏光板に入射するが、その振動方向(偏光軸)が $\xi + 90^\circ$ となるため偏光板で吸収される。このように、円偏光板を備えることで外光の反射電極などによる反射を抑制することができる。一方、発光層から出射する光に着目すると出射光はランダム偏光であるため、偏光板で少なくともその 50% が吸収されて損失となる。このため、上述のとおり青色の有機 EL 素子の外部発光効率 η_{ext} が 5.0~7.5% であるとする、円偏光板を備えることで、その効率は 2.5~3.75% 以下に低下することになる。一方、赤色と緑色に関

としては三重項材料が既に実用化されており、理想的にはキャリア再結合により生成する励起子が全て発光に寄与するため、青色の約4倍の発光効率を得られる。したがって、青色光の偏光板での吸収損失を低減し、光利用効率を向上することで、赤色や緑色との外部発光効率のバランスが改善され、より効果的に消費電力を低減できると考えられる。

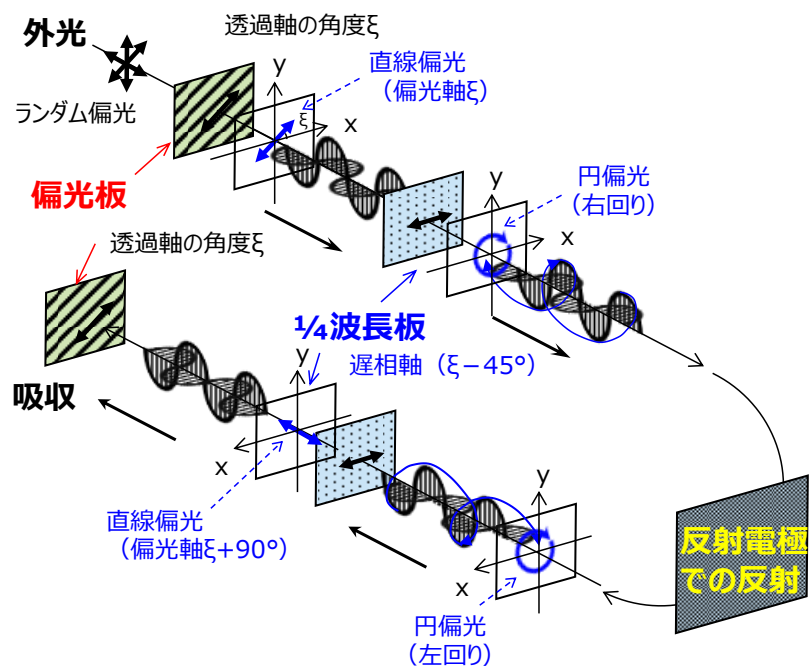


図 4-3 円偏光板の機能説明図

4. 3 光リサイクル構造による青色光の光利用効率向上

4. 3. 1 コレステリック液晶の選択反射を用いた光リサイクル構造

青色光の光利用効率を向上する方法として、コレステリック液晶の選択反射を用いた光リサイクル構造を青色のみに適用する方式を考案した⁶⁾⁷⁾。図 4-4 にその構造を示す。図示のとおり本方式は、有機 EL 素子の光出射側に画面の全面を覆うように青色に選択反射帯域を有するコレステリック液晶層(青色反射コレステリック液晶層)と円偏光板をこの順に積層したものである。

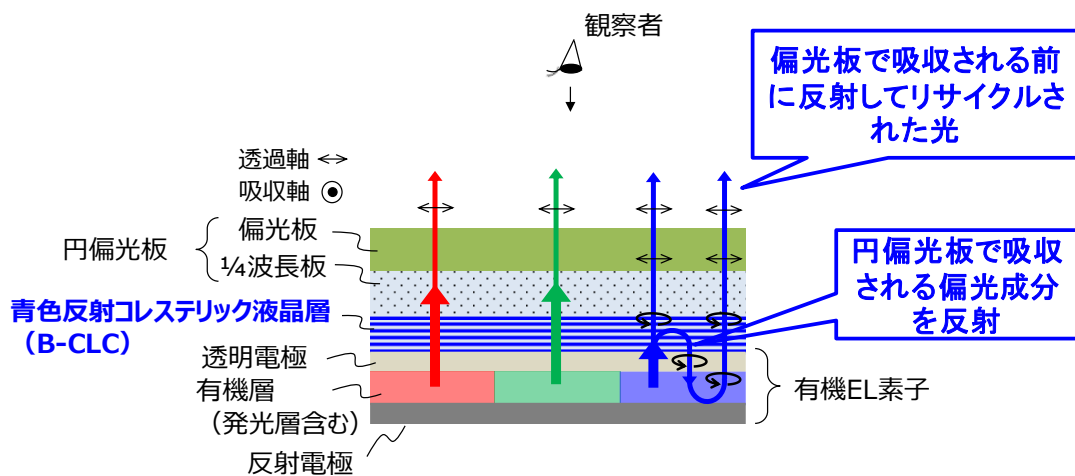


図 4-4 コレステリック液晶の選択反射を用いた光リサイクル構造

本方式は以下のとおり作用する。発光層から出射する光は直接、あるいは発光層裏面の反射電極で反射したのち、青色反射コレステリック液晶層(B-CLC;Blue reflective - Cholesteric Liquid Crystal layer)に入射する。B-CLCに入射した光は選択反射により青色に相当する波長帯域であって特定の回転方向の円偏光(例えば、ここでは左回りの円偏光)成分は反射し、その他の光は透過する。B-CLCを透過した青色光は1/4波長板の作用により円偏光から直線偏光に変換され、偏光板ではほぼ吸収されことなく観察者へ向かう。一方、B-CLCで反射した光は、偏光状態をおおよそ維持したまま発光層等を透過し、反射電極で反射して再びB-CLCに向かう。B-CLCに向かう光は反射電極での反射の際、光の進行方向が変わることで回転方向が逆の円偏光(右回りの円偏光)となる。このため今度はB-CLCを透過し、1/4波長板の作用により直線偏光に変換されたのち、偏光板を透過して観察者へ向かう。つまり従来、偏光板で吸収され、損失となっていた青色光を偏光板で吸収される前にB-CLCで反射して再利用できるようになる。

さらに B-CLC で反射して再利用される光の波長帯域を、発光層から出射する青色光の波長帯域よりも狭くすると、実際に観察者に向かう青色光はその発光スペクトルがより急峻で帯域の狭い光となる。このため、発光層から出射するオリジナルの光よりも色純度の高い青色光を得ることが可能となる。つまり、赤色と緑色へは何も影響しない状態で、青色のみ偏光板での吸収損失を低減することで、光利用効率を向上し、それと同時に色純度の改善も期待できる。

なお、B-CLC としては高分子液晶からなるコレステリック液晶層を面内に位相差が無いトリアセチルセルローズフィルム上に形成したものを用いる。これを透明な粘着剤によって、円偏光板(偏光板と 1/4 波長板を貼り合わせたもの)と有機 EL パネルの間に貼り合わせることで本構造を実現する。つまり、本構造は有機 EL パネルの上に B-CLC と円偏光板を積層するだけの比較的単純な構造であり、画素毎に位置合わせする必要がないためアセンブリが容易という特徴を有する。

4. 3. 2 光リサイクル構造の効果と課題

表 4-1 に仕様を示す有機 EL パネルに選択反射の中心波長 λ_0 が 450～460nm、波長帯域 $\Delta \lambda$ が約 50nm の B-CLC と円偏光板を積層して、光リサイクル効果の検証実験を行った。発光スペクトル及び反射スペクトルは分光放射輝度計 (Spectra Scan PR705, Photo Research 社製) を用いて測定した。反射スペクトルは積分球 (Labsphere LM-1400, Labsphere Inc. 製) を光源とし、積分球に設けられたポートを介して測定した。反射率は標準拡散反射板 (BaSO_4) を基準 (100%) とした。なお、有機 EL 素子の発光材料は赤色、緑色、青色の全てを蛍光材料とした。

図 4-5 に発光スペクトルを示す。図には赤色、緑色、青色の各色をそれぞれ単色で発光させたときの発光スペクトルを併記しており、横軸が波長、縦軸が色毎に B-CLC がなく円偏光板のみを備える場合の最大発光強度 (ピーク強度) で規格化した相対強度を示す。図から明らかなとおり、青色は B-CLC がある場合に光リサイクル効果によって、発光強度が最大となる波長 (466nm) の強度

表 4-1 有機 EL パネルの仕様

項目	仕様
パネルサイズ(対角)	3.5インチ
駆動方式	アクティブマトリクス (低温polySi)
画素数	240×320
画素ピッチ	223.5 μm (サブピクセル74.5 μm)
画素密度(ppi)	114
開口率	38%
タイプ	ボトムエミッション

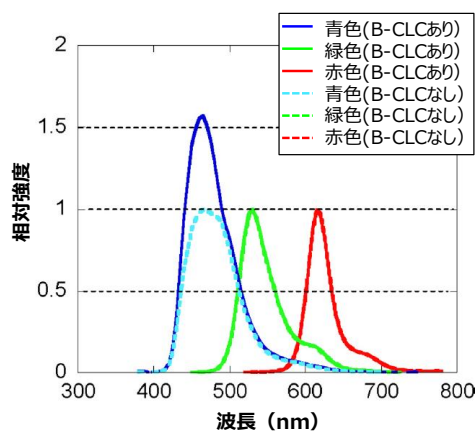


図 4-5 発光スペクトルの比較

が 56% 向上し、視感輝度としては約 10% 上昇した。これは青色単色については従来の構造と同じ発光強度(あるいは輝度)の場合に消費電力を下げられることを意味し、単位電力当たりの発光効率が向上したことを示す。一方、赤色と緑色の光については、B-CLC の有無で有意な差はなく、B-CLC が他の色には何ら影響を及ぼすことなく青色に対応する波長帯域にのみ選択的に作用していることがわかる。

図 4-6 に光利用効率の波長依存性を示す。ここでは光利用効率を有機 EL パネルから出射したあとの光の利用効率で定義する。具体的には従来の方式(円偏光板を備える有機 EL パネル)の発光強度 I_c 、もしくは本方式(円偏光板及び B-CLC を備える有機 EL パネル)の発光強度 I_n を円偏光板や B-CLC など的一切備えないオリジナルの有機 EL パネルの発光強度 I_o で除した値と定義する。つまり、従来の方式の光利用効率は I_c/I_o 、本方式の光利用効率は I_n/I_o である。同図から明らかなおとおり、本方式は従来の方式と比較すると青色に相当する波長帯域の光利用効率が向上した。従来の方式では偏光板の透過率が短波長帯域において低いことが原因で、緑色や赤色に相当する波長よりも青色に相当する波長帯域の光利用効率が低くかった。これに対し、本方式では青色の光利用効率が赤色や緑色よりも高くなり、青色の発光強度が最大となる波長(発光ピーク波長)では、緑色や赤色の 1.5 倍程度の光利用効率を得られた。従来の方式と比較すると、発光ピーク波長 466nm での光利用効率は 43% から 67% に向上した。

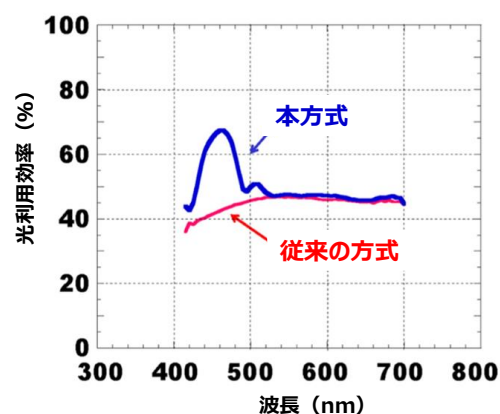


図 4-6 光利用効率の波長依存性の比較

次に図 4-7 と図 4-8 に反射スペクトルを示す。図 4-7 は本方式(円偏光板及び B-CLC がある場合)、図 4-8 は従来の方式(円偏光板のみの場合)を示し、画面垂線からの極角 θ が 7.5° 、 15° 、 30° 及び 45° の結果を示す。ほぼ正面方向(極角 $\theta = 7.5^\circ$)の反射スペクトルを比較する

と、従来の方式に対し、本方式では青色に相当する波長帯域の反射が増加した。これは、次項で詳述するが B-CLC の選択反射に起因するものである。また、極角 θ が大きくなると、本方式と従来の方式は共に反射率が大きくなっているが、特に本方式では極角 $\theta = 45^\circ$ での反射率が著しく増大した。このことは明るい環境下で画面を斜め方向から観察したときに、本方式ではコントラスト比が著しく低下することを意味し、改善の必要がある。

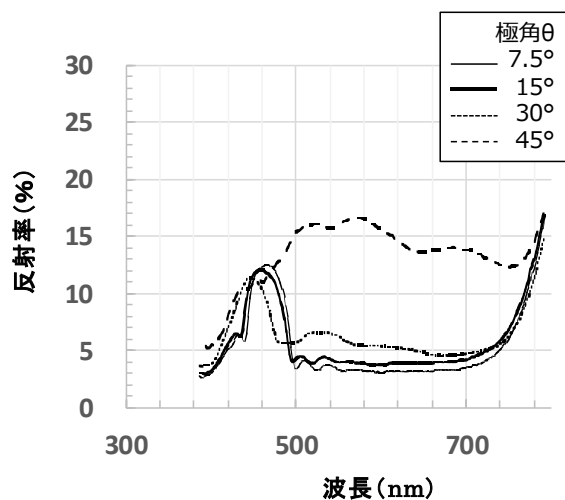


図 4-7 反射スペクトルの角度依存性(本方式:B-CLC あり)

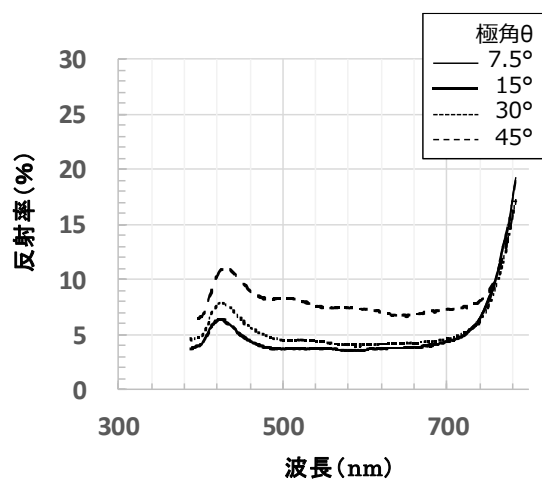


図 4-8 反射スペクトルの角度依存性(従来の方式:B-CLC なし)

4. 3. 3 反射増大の原因と対策

前項で述べたとおり本方式では、青色光の光利用効率向上という効果が得られることを確認できたが、以下に示す 2 種類の外光反射増加という課題が判明した。

- ① 青色の波長帯域での反射増加
- ② 斜め方向から観察した際の反射増加

これらの反射増加はいずれも B-CLC に起因するが、そのメカニズムの違いから 2 種類に分類して議論を進める。①は、B-CLC の選択反射に起因するものである。また、②は、B-CLC が光学的に負の屈折率楕円体(ネガティブ C プレート)として機能することに起因する。

図 4-9 に B-CLC の選択反射に起因する反射増加のメカニズムを示す。明るい環境において周囲から有機 EL ディスプレイに入射する外光は一般にランダム偏光である。このため入射する外光は偏光板を透過する際、少なくともその半分が吸収される。偏光板を透過した光は 1/4 波長板の作用を受けて円偏光(例えば右回りの円偏光)となり B-CLC を透過する。B-CLC を透過した光は透明電極や発光層を含む有機層を偏光状態をほぼ維持したまま通過し、反射電極で反射する際、光の進行方向が変わることで回転方向が逆の円偏光(左回りの円偏光)となり、再び B-CLC に入射する。B-CLC に入射した光のうち、選択反射帯域以外、すなわち青色以外の光はそのまま B-CLC を透過して、1/4 波長板の作用により直線偏光に変換されたのち、偏光板に吸収されるため外部には出ない。一方、B-CLC の選択反射帯域に相当する光は B-CLC で反射して、再び反射電極で反射したのち、今度は B-CLC 及び円偏光板を透過して外部に出る。これが不要反射光となり、反射率が増加する。この不要反射光は反射電極などでの 2 回の反射において、その一部が吸収されて減衰している。さらにこの不要反射光は明所視の比視感度が低い青色に相当する波長の光に限られるため、視感反射率⁹⁾としては小さくなる。このため B-CLC の選択反射に起因する反射の増加は致命的ではなく許容できるものとする。

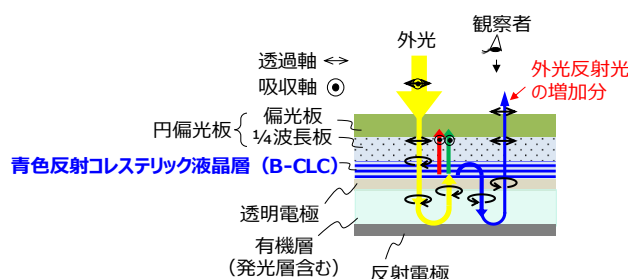


図 4-9 B-CLC の選択反射に起因する反射の増加

一方、斜め方向の反射増加のメカニズムは以下のとおりである。コレステリック液晶層は棒状の液晶分子が平行配列した層を、その分子長軸の方向を回転するようにずらしながら複数積層した構造をしている。このためマクロに観察すると面内方向には屈折率異方性がなく、その屈折率は液晶分子の長軸方向の屈折率 $n_{//}$ と短軸方向の屈折率 n_{\perp} との平均屈折率 n_m (式(2-19)参照)となる。また、厚み方向の屈折率は液晶分子の短軸方向の屈折率 n_{\perp} となる。液晶分子の屈折率は、分子長軸方向の屈折率 $n_{//}$ が短軸方向の屈折率 n_{\perp} よりも高いため、コレステリック液晶層は光学的に負の屈折率楕円体(ネガティブ C プレート)として機能する。図 4-10 にコレステリック液晶層が光学的に負の屈折率楕円体として機能することの説明図を示す。図示のとおり、コレステリック液晶層の厚み方向と直交する面内において、互いに直交する方向の屈折率(主屈折率)をそれぞれ n_x 、 n_y 、厚み方向の屈折率を n_z とすると、 $n_x = n_y = n_m$ 、かつ $n_z = n_{\perp}$ と考えることができる。ネガティブ C プレートは正面方向から観察すると光学的に等方とみなせるが、斜め方向から観察すると屈折率の異方性

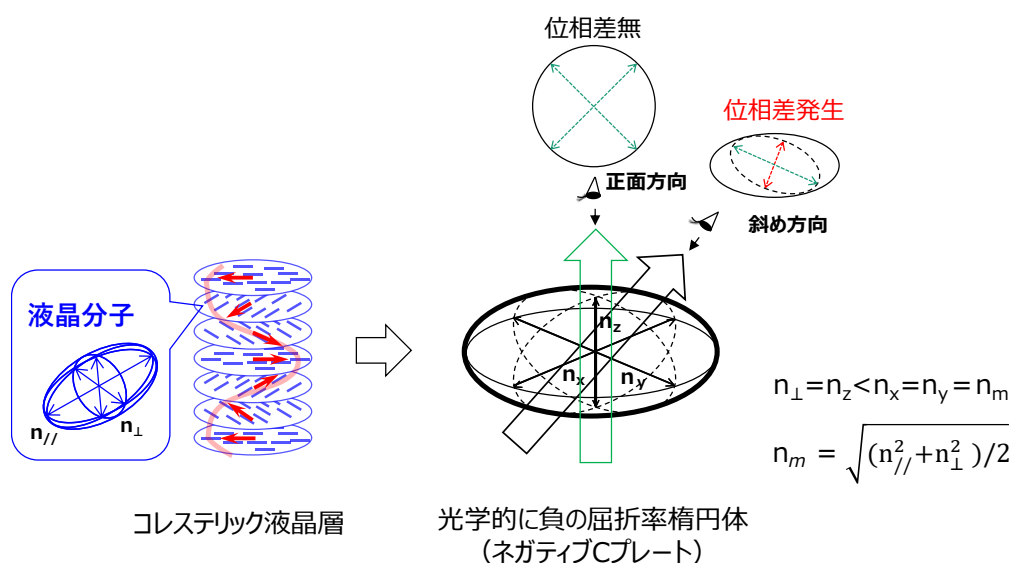


図 4-10 コレステリック液晶層がネガティブ C プレートとして機能することの説明図

が現れて、これを通過する光に対し、その厚みに応じた位相差を発生させる。斜め方向の反射の増加は、斜め方向に進む光の偏光状態が B-CLC で生じる不要な位相差により変化して、偏光板で十分に吸収されなくなることが原因である。

このため、斜め方向の反射増加を抑制するには、B-CLC で発生する位相差を打ち消し、光学的に補償をする位相補償層を導入すればよい。具体的には面内方向には屈折率差がなく、厚み方向の屈折率が面内方向の屈折率よりも大きい光学的に正の屈折率楕円体(ポジティブ C プレート)を

位相補償層として導入すればよい。図 4-12 にこの概念を示す。図示のとおり、位相補償層としては厚み方向の屈折率 n_z と、厚み方向と直交する面内の屈折率 n_x 、 n_y 、との関係が、 $n_z > n_x = n_y$ の関係を満たす透明体によって構成する。

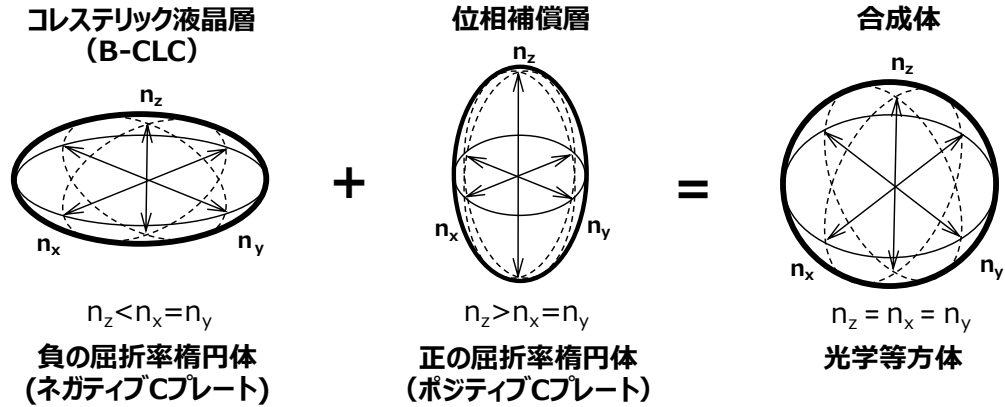


図 4-12 位相補償の概念図

ここで、ネガティブ C プレートやポジティブ C プレートを角度(極角) θ の方向に進む光に対する屈折率差 $\Delta n(\theta)$ は式(4-2)で表すことができる。

$$\Delta n(\theta) = n_x - \frac{\sqrt{n_x^2 n_z^2}}{\sqrt{n_x^2 \sin^2 \theta + n_z^2 \cos^2 \theta}} \quad (4-2)$$

また、B-CLC の厚さを d_{CLC} 、極角 θ の方向に進む光に対する屈折率差を $\Delta n_{CLC}(\theta)$ とし、位相補償層の厚さを d_c 、極角 θ の方向に進む光に対する屈折率差を $\Delta n_c(\theta)$ とすると、理想的には式(4-3)を満足する位相補償層を実現すれば、斜め方向から観察した際、B-CLC で発生する不要な位相差を相殺し、補償して反射の増加を抑制することができる。

$$\frac{\Delta n_{CLC}(\theta) \cdot d_{CLC}}{\cos \theta} = - \frac{\Delta n_c(\theta) \cdot d_c}{\cos \theta} \quad (4-3)$$

そこで、位相補償層の仕様を式(4-4)で定義する厚み方向の位相差 R_{th} をパラメーターとして検討した。

$$R_{th} = (n_x - n_z) \cdot d \quad (4-4)$$

図 4-13 に示すとおり、B-CLC と位相補償層を示す屈折率楕円体の合成体は、 $n_z \doteq n_x = n_y$ である等方体に近似できる。このため、B-CLC と位相補償層の R_{th} をそれぞれ、式(4-5)、式(4-6) に示すように定め、その比である $|R_{thc}|/|R_{thCLC}|$ をパラメーターとして、B-CLC による位相差 $\Delta n_{CLC}(\theta) \cdot d_{CLC}/\cos \theta$ と位相補償層による位相差 $\Delta n_c(\theta) \cdot d_c/\cos \theta$ との和である位相差 PD(式(4-7)) が小さくなる条件を求めることにした。

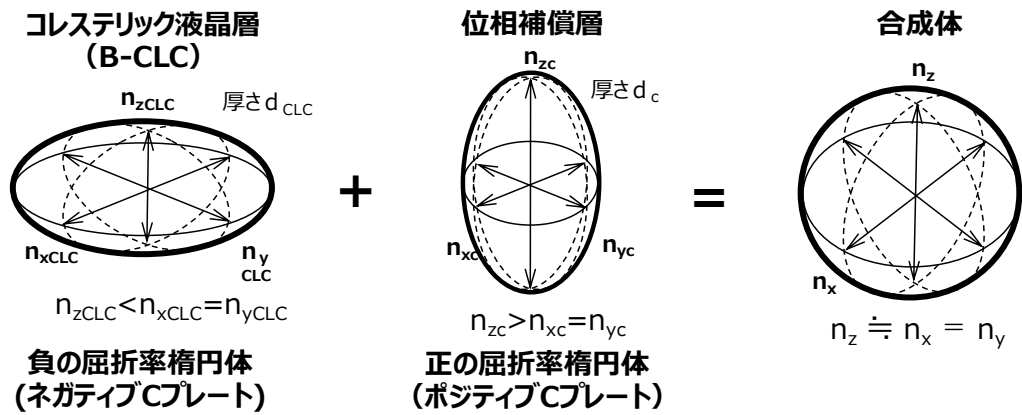


図 4-13 位相補償層のパラメーター

$$R_{thCLC} = (n_{xCLC} - n_{zCLC}) \cdot d_{CLC} \quad (4-5)$$

$$R_{thc} = (n_{xc} - n_{zc}) \cdot d_c \quad (4-6)$$

$$PD = \frac{\Delta n_{CLC}(\theta) d_{CLC}}{\cos \theta} + \frac{\Delta n_c(\theta) d_c}{\cos \theta} \quad (4-7)$$

ここで、B-CLC の R_{th} は R_{thCLC} とし、面内方向の屈折率を n_{xCLC} 、厚さ方向の屈折率を n_{zCLC} 、厚さを d_{CLC} とする。また、位相補償層の R_{th} を R_{thc} とし、面内方向の屈折率を n_{xc} 、厚さ方向の屈折率を n_{zc} 、厚さを d_c とする。

図 4-14 に $|R_{thc}|/|R_{thCLC}|$ に対する位相差 PD の角度(極角)依存性の計算結果を示す。この図は B-CLC と位相補償層を構成する液晶分子の Δn を 0.131、B-CLC の厚さ d_{CLC} を $3.3 \mu m$ 、 R_{thCLC} を 220nm とした場合の計算結果である。なお空気と B-CLC や位相補償層などの光学部材との屈折

率の違いを考慮すると、これら光学部材中の光の進行角度は極角 $\theta = 0^\circ \sim 40^\circ$ 程度の範囲に限定されるため、この角度範囲内において位相差PDの値を検討すれば良い。外光反射が小さく、明るい環境でもコントラスト比の高いディスプレイを実現するには、この角度範囲において位相差PDが0であることが理想である。

同図が示すとおり、 $|R_{thc}|$ と $|R_{thCLC}|$ の値が等しい場合、すなわち、 $|R_{thc}|/|R_{thCLC}|=1.00$ の場合、位相差PDは極角 θ が大きくなるにつれて大きくなる。位相差PDを幅広い角度範囲において、できるだけ0に近づけるには、 $|R_{thc}|/|R_{thCLC}|$ の値を1.15程度となる位相補償層を選択することが望ましいことがわかる。

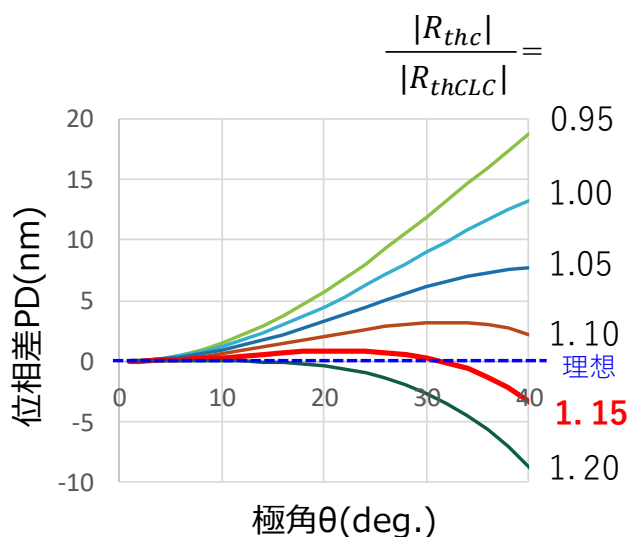


図 4-14 位相差 PD の角度依存性

図 4-15 に $|R_{thc}|/|R_{thCLC}|$ の値が 1.14 となる条件、具体的には $|R_{thCLC}|$ が 220nm の B-CLC に対し、 $|R_{thc}|$ が 250nm となる位相補償層を B-CLC と円偏光板との間に配置して実測した視感反射率の角度依存性を示す。同図には比較のため、位相補償層を設けない場合と従来の方式(円偏光板)の視感反射率を併記した。また、図 4-16 には位相補償層を導入した本方式の有機 EL パネルの反射スペクトルの角度依存性を示す。図 4-15 から明らかとなっており、位相補償層を導入することで極角 θ の増加に伴う外光反射の増加が抑制できることが確認できた。例えば、極角 $\theta = 45^\circ$ では位相補償層の導入によって、視感反射率が 17%から 6.4%へ大幅に低減できた。これは、図 4-16 と図 4-7(位相補償層が無い場合)を比較すると分かり易いが、斜め方向に進む光に対して B-CLC によ

って生じる不要な位相差を位相補償層により相殺し、補償することでB-CLC の選択反射以外の波長における反射の増加を抑制できたためである。

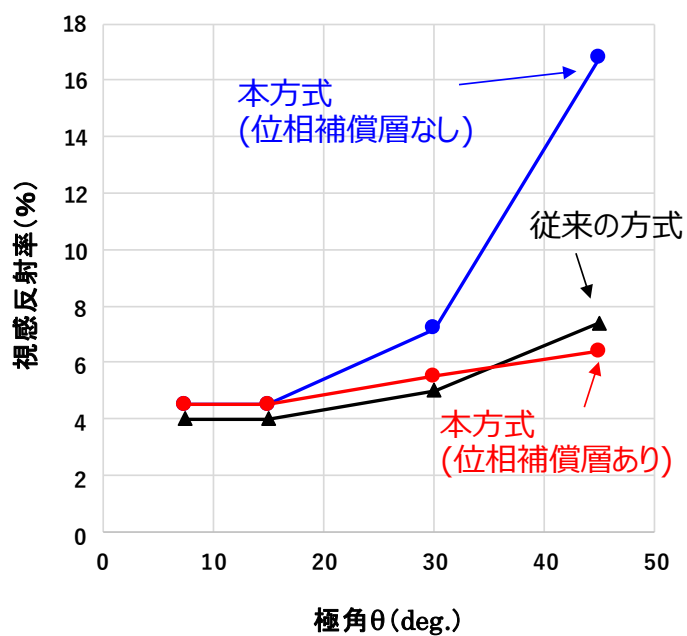


図 4-15 視感反射率の角度依存性

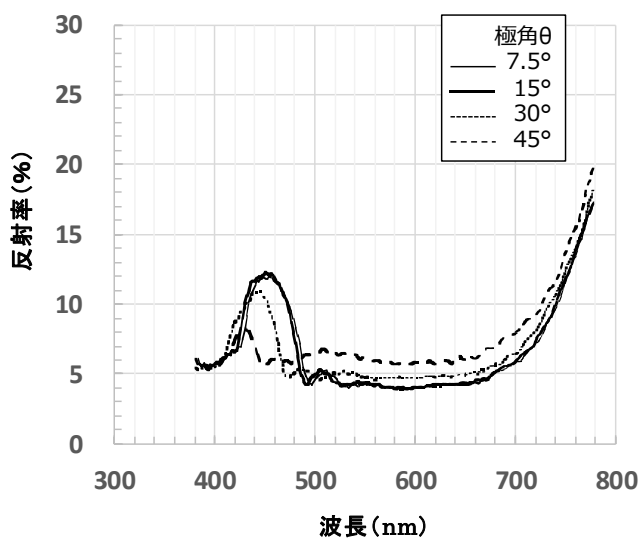


図 4-16 反射スペクトルの角度依存性(本方式:位相補償層有)

4.3.4 光リサイクル構造を有する有機 EL ディスプレイの性能

図 4-17 と図 4-18 にそれぞれ従来の方式(円偏光板)と本方式(位相補償層有)の有機 EL ディスプレイの発光スペクトルを示す。これらの図は共に CIE1931 標準表色系¹⁰⁾において色度座標が $(x, y) = (0.310, 0.316)$ となる白色の発光スペクトルとこの白色を実現する各色(赤色、緑色及び青色)の発光スペクトルを示す。また、縦軸は従来の方式における緑色の最大発光強度で規格化した相対強度を示す。なお、図 4-18 には光リサイクルの効果を示すため、従来の方式において同じ駆動条件で青色を発光させたときの発光スペクトルも併記した。

図 4-17 に示すとおり、従来の方式で白色を再現する場合、青色や赤色と比較して、緑色はより小さな発光強度となる。これは白色を再現する際の各色のバランスから決まるものであり、青色の発光が緑色成分を一部含んでいることも影響している。図 4-18 に示すとおり本方式においても白色を再現する際、緑色の発光強度は青色や赤色と比べると小さくなる。ここで、本方式では光リサイクル効果により、青色光の光利用効率が向上(ピーク波長 466nm で 56% 向上)している。このため、図 4-18 に併記したとおり、青色の有機 EL 素子には従来の方式において緑色と同程度のピーク発光強度となる電力を投入すれば同じ白色を再現することが可能となる。

図 4-19 は白色表示時の各色有機 EL 素子(発光素子)の消費電力を示し、従来の方式で白色表示したときの有機 EL 素子の全消費電力で規格化した値を示す。上述のとおり、従来の方式では緑色の発光強度が赤色や青色と比較して小さいため、緑色の消費電力(規格化電力)は 0.13 と小さい。一方、本方式では、青色光の光利用効率の向上により、青色の消費電力が従来の方式に比べて約 48% 減少する(規格化電力が 0.42 から 0.22 に減少)。さらに、本方式では緑色の消費電力が約 30% 増加し(規格化電力が 0.13 から 0.17 に増加)、色毎の消費電力のバランスがやや改善する。赤色については緑色の発光強度が増加する分、色毎のバランスが変化して消費電力が微減する(規格化電力が 0.45 から 0.44 に減少)。これらの結果、白色表示時の有機 EL 素子の消費電力は全体で 17% 低減した(白色表示の規格化電力が 0.83 に低減)。

図 4-20 に本方式と従来の方式の色再現範囲を示す。図 4-17 及び図 4-18 に示すとおり、青色の発光スペクトルの半値幅は従来の方式が 77nm に対して、本方式では 64nm とより急峻な分布となった。このため、色純度の指標である刺激純度¹¹⁾は、従来の方式が 71% に対し、本方式では 76% に向上した。また、色度座標から求められる単色光刺激の波長である主波長¹¹⁾¹²⁾は 480nm から 477nm へと短波長側にシフトしてより深い青色を実現した。このように青色の色度が改善することで色再現範囲(CIE1931)は NTSC 比(面積比)で 65% から 69% に拡大した。なお主観評価の結果

から「青色彩度を低減させた場合に最も画質の劣化が大きい」¹³⁾との報告がある。このため、本方式による青色の彩度の向上は主観的には数値以上の効果をもたらす可能性がある。

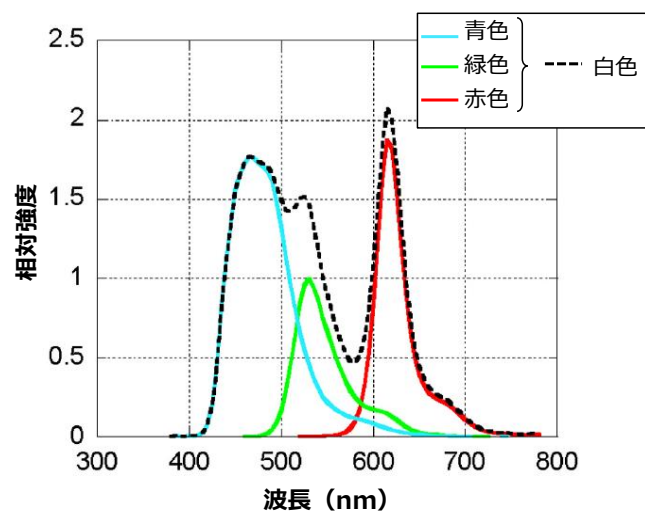


図 4-17 発光スペクトル(従来の方式)

白色色度(x、y) = (0.310, 0.316)

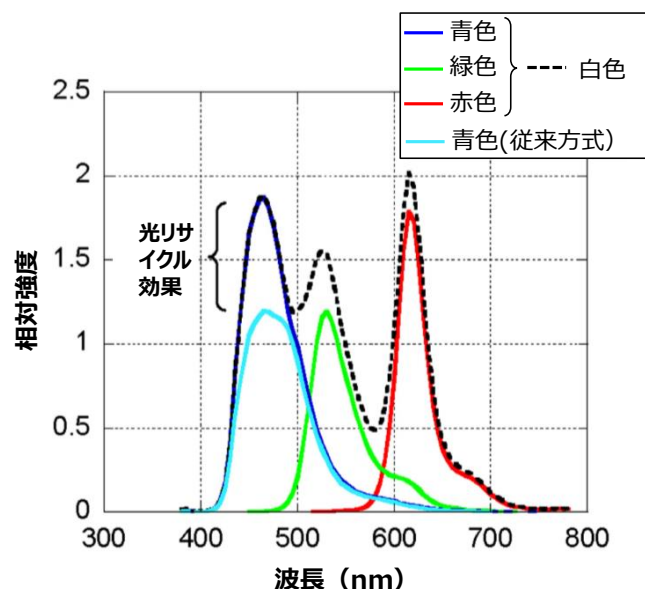


図 4-18 発光スペクトル(本方式)

白色色度(x、y) = (0.310, 0.316)

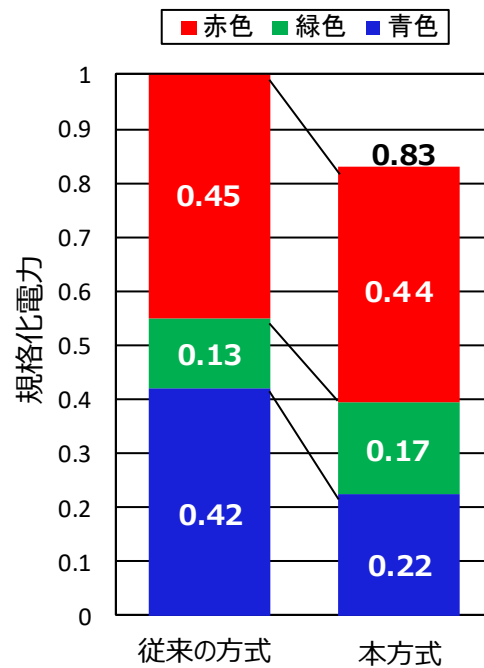


図 4-19 白色表示時の各色有機 EL 素子(発光素子)の消費電力

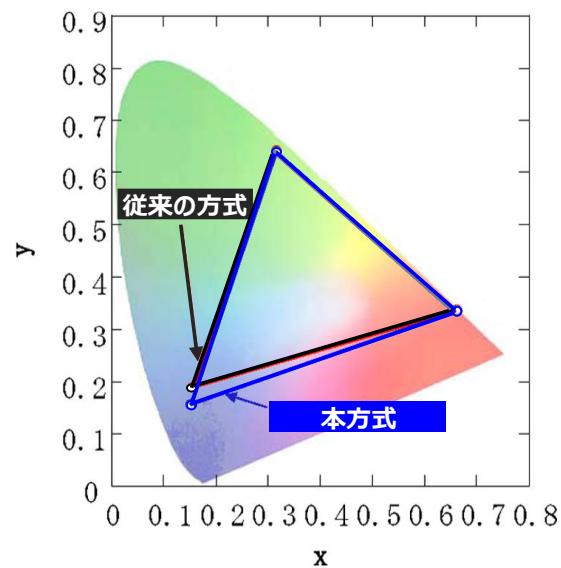


図 4-20 色再現範囲(CIE1931)

図 4-21 に有機 EL ディスプレイの正面方向 ($\theta = 7.5^\circ$) における反射スペクトルを示す。図には比較のため、本方式と従来の方式に加えて有機 EL パネル単体のデータも併記した。有機 EL パネ

ル単体の場合、反射電極での反射などにより視感反射率が 65%と高くなる。従来の方式では、円偏光板の作用によって反射電極などによる反射が抑制されるため、視感反射率が 4.3%と低くなる。一方、本方式では図 4-9 を用いて説明したとおり、B-CLC の選択反射によって、その波長帯域の反射が増加する。この増加する不要な反射光は偏光板の 2 回の透過と、反射電極などでの 2 回の反射でその一部が吸収されて減衰する。このため、同波長帯域での有機 EL パネル単体の反射率が 50%以上あるのに対し、本方式の同波長帯域での反射率は 13%程度に抑制されている。また、この反射率が高くなる波長帯域は視感度が低い短波長領域であるため、視感反射率は従来の方式に対して 0.5%増加の 4.8%に留まる。

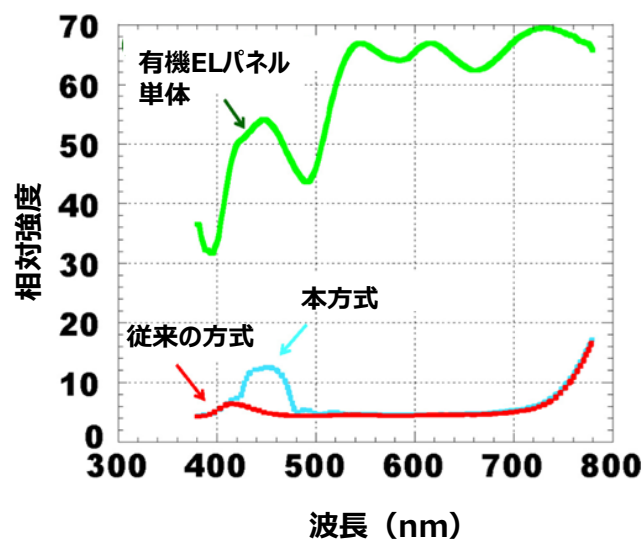


図 4-21 反射スペクトルの比較

4.4 まとめ

有機 EL ディスプレイの低消費電力化のため、発光効率が最も低い青色に着目し、その偏光板での吸収損失の低減による光利用効率の向上を検討した。具体的にはコレステリック液晶による選択反射を利用することで、従来、偏光板で吸収され損失となっていた青色光を、偏光板で吸収される前に反射して再利用する光リサイクル構造を考案し、検討した。この際、コレステリック液晶層が光学的に負の屈折率楕円体として機能することで、斜め方向の外光反射が増加するという課題が判明した。その対策として新たに光学的に正の屈折率楕円体からなる位相補償層を導入した。具体的には厚み方向の位相差 R_{th} の絶対値がコレステリック液晶層よりも 14% 高い位相補償層を設けることで、斜め方向の反射増加を抑制できることを確認した。

本方式による有機 EL ディスプレイを試作・評価した結果、以下の効果を確認した。

- (1) 青色光の光利用効率の向上(ピーク波長の発光強度 56%向上)とそれに伴う有機 EL 素子の消費電力の低減(青色単色 48%、白色表示 17%)。
- (2) 青色の色度改善(刺激純度 71%→76%、主波長 480nm→477nm)とそれに伴う色再現範囲の拡大(NTSC 比 65%→69%)。

本方式では、これらの効果を発光材料や発光素子の構造を変えることなく得ることができる。つまり、本方式は既存の有機 EL パネルの画面上に、精密な位置合わせが不要なフィルム(コレステリック液晶層及び位相補償層)を付加するという比較的容易な方法により、青色光の光利用効率の向上による消費電力の低減と青色の色純度向上及び色再現範囲の拡大を得ることができる。

参考文献

- 1) G. Gu, D. Z. Garbusov, P. E. Burrows and S. Venkatesh, "High-external-quantum-efficiency organic light-emitting devices", *Opt. Lett.* **22**(6), 396-398 (1997).
- 2) C. F. Madigan, M. H. Lu and J. C. Sturm, "Improvement of output coupling efficiency of organic light-emitting diodes by backside substrate modification", *Appl. Phys. Lett.* **76**(13), 1650-1652 (2000).
- 3) A. N. Krasnov, "High-contrast organic light-emitting diodes on flexible substrate", *Appl. Phys. Lett.* **80**(20), 3853-3855 (2002).
- 4) S. J. Knag, B. G. Roh, S. W. Kim, J. I. Kang, H. B. Jun, J. Y. E, K. S. Lee, H. S. Kim, Y. C. Cha, and W. Y. Kim, "2.1-in. passive matrix ECR (Enhanced Contrast Ratio) OLED using black layer technology," *Proc. IDW'03*, 1367-1370 (2003).
- 5) J. Vieira, "More contrast and luminance for EL", *Information Display*, 2/95, 18-20 (1995).
- 6) M. Adachi, S. Aratani and K. Yanagawa, "Light Out-Coupling Enhancement of OLEDs by a Polarized Light Recycling Structure", *SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap.* **36**, 1285-1287, (2005).
- 7) M. Adachi, S. Aratani and K. Yanagawa, "Enhancement of blue-light-emission properties for OLED display by using a polarized light-recycling structure", *J. Soc. Inf. Disp.* **16**(8), 875-881 (2008). [DOI: 10.1889/1.2966450]
- 8) 三上明義、「有機 EL ディスプレイの基礎」、映像情報メディア学会誌 **67**(9)、800-805 (2013)。
- 9) 日本色彩学会編、「色彩科学ハンドブック(第3版)」、財団法人東京大学出版、86 (2011)。
- 10) 日本色彩学会編、「色彩科学ハンドブック(第2版)」、財団法人東京大学出版、99-100(1998)。
- 11) 大田登、「色彩工学第2版」、東京電機大学出版局、77-79 (1980)。
- 12) 池田光男、「色彩光学の基礎」、朝倉書店、86 (1980)。
- 13) 鈴木貴博、下平美文、大橋剛介、池田弘明、「ディスプレイにおける色再現範囲の画像品質に対する影響」、映像情報メディア学会誌 **53**(8)、1147-1152(1999)。

第 5 章 視野角制御機能の開発

5.1 はじめに

移動通信システムの進歩に伴いスマートフォンなどのモバイル機器を通じて、いつでもどこでも様々な情報にアクセスできる社会環境が実現しつつある。このためモバイル機器に搭載される電子ディスプレイには、公共の場でプライバシーを確保するために他人から覗き見されない狭い視野角と、複数人で閲覧、観賞する場合に有効な広い視野角とを使用状況に応じて任意に切り替えられることが望まれると考えた(図 1-11 参照)。

電子ディスプレイの視野角を制限して覗き見を抑制する手段として、光を吸収する層と透過する層を交互にルーバー状に配置したフィルム(以下、ルーバーフィルムと呼ぶ)が実用化されている。ルーバーフィルムは正面方向に進む光は透過するが、斜め方向に進む光は吸収し、遮光するため電子ディスプレイの前面に配置することで画面の覗き見を抑制することができる。このためプライバシーを守るために ATM(Automated Teller Machine)などの公共用機器に組み込まれたり、携帯電話やノートパソコン向けに市販されている。

ルーバーフィルムは覗き見の抑制手段として有効に機能するが、視野角を制限したくない場合には取り外す必要がある。このため視野角が狭い状態と広い状態を容易に切り替えることができる電子ディスプレイ、すなわち視野角の動的制御が可能な電子ディスプレイが望まれる。このような要求に対し、視野角制御機能を備える液晶ディスプレイが種々提案され¹⁾⁻¹²⁾、その一部は製品化²⁾¹³⁾された実績がある。

次節で述べるとおり、液晶ディスプレイにおいて視野角の動的制御を実現する手段は種々あるが、本研究では、今後、市場の拡大が予想される有機 EL ディスプレイにも適用可能な技術を対象とする。具体的には、ルーバーフィルムと同様、画面上に配置することで機能するものを開発する。この際、モバイル機器に搭載される液晶ディスプレイと有機 EL ディスプレイが共に画像光として偏光を出射することから、偏光制御技術を活用した視野角制御素子を開発する。また、電子ディスプレイとしてインプレーンスイッチングモード(In-plane switching mode:以下、IPS と略す)の液晶ディスプレイ¹⁴⁾や有機 EL ディスプレイなど視野角が広いディスプレイとの組み合わせを前提とし、より広い角度範囲で機能するものを目指す。

5. 2 視野角制御技術の分類

表 5-1 は液晶ディスプレイの視野角制御技術の分類表である。液晶ディスプレイの視野角を制御する方法はその原理の違いから以下の 3 つに大別でき、本論文では、それらを以下のように呼称する。

- ・バックライト光指向性制御方式
- ・液晶パネル内位相差制御方式
- ・視野角制御素子方式(液晶シャッター方式)

バックライト光指向性制御方式は、液晶パネルに照射するバックライトからの光の指向性を可変とすることで液晶ディスプレイの視野角を制御する技術¹⁾⁴⁾である。この方式には光散乱制御方式と光源切替方式がある。光散乱制御方式は、出射光の指向性が高いバックライトの上に、光がそのまま透過する状態と散乱しながら透過する状態を切り替え可能な光学素子(光散乱制御素子)を積層することで実現する方法である。指向性の高い光を出射するバックライトとしては、LED 光源と導光板を組み合わせたものの他、有機 EL 素子を光源とし、マイクロレンズアレイを組み合わせたもの¹⁵⁾なども利用できる。光散乱制御素子としては液晶を高分子中に分散させた PDLC (Polymer dispersed liquid crystal)¹⁶⁾や連続する液晶層中に高分子を網目状に形成した PNLC (Polymer network liquid crystal)¹⁷⁾などの液晶セルを用いることができる。このような液晶セルは液晶層に印加する電圧によって、入射する光を散乱する状態と、そのまま透過する状態とで任意に切り替えることができる。光散乱制御素子が光散乱状態の場合、液晶パネルに入射する光は広がりのある光となる。このため広視野角な画像表示が実現できる。一方、光散乱制御素子が入射する光をそのまま透過する状態の場合、バックライトから出射する指向性の高い光がそのまま液晶パネルに入射するので、視野角の狭い画像表示が実現できる。光源切替方式は、出射光の指向性が高いバックライトと、指向性の低いバックライトを積層するものである。各バックライトはそれぞれ光源と導光板を備えており、各バックライトの光源の点灯、消灯の切り替えで液晶パネルに照射する光の指向性を制御し、視野角を切り替える⁴⁾。

液晶パネル内位相差制御方式は、液晶パネル内の液晶分子の配向状態に依存する視野角特性の違いを利用して視野角を制御するものであり、斜め方向のコントラスト比を低減することで狭視野角状態を実現するものである。具体的な方法としては、ひとつの画素内に広視野角状態と狭視野角状態に対応する 2 つの領域を設ける方法⁵⁾¹⁰⁾と、画素内に表示用電極に加え、視野角制御用の電極を設けて、各電極に印加する電圧で視野角を制御する方法¹¹⁾¹²⁾がある。

視野角制御素子方式は液晶パネルの表側または裏側に、正面方向の透過率を変化させることなく、特定の方位角及び極角範囲の透過率を制御できる視野角制御素子を配置する方式である。視野角制御素子は液晶セルと偏光板から構成されるものであり、光が表側から入射しても、裏側から入射しても機能するので、有機 EL ディスプレイや反射型の液晶ディスプレイなど様々な電子ディスプレイに適用できる。ここで、バックライト光指向性制御方式と液晶パネル内位相差制御方式は、いずれも液晶ディスプレイにおいて有効な方式だが、有機 EL ディスプレイには適用できない。このため、本研究では有機 EL ディスプレイにも適用可能な視野角制御素子方式について検討した。視野角制御素子を構成する液晶セルとしては、ネマチック液晶を用いたねじれ配向の液晶セル²⁾、平行配向の液晶セル¹³⁾、垂直配向の液晶セル⁶⁾⁷⁾、ハイブリッド配向の液晶セル³⁾⁸⁾⁹⁾が提案されている。垂直配向した液晶セルは液晶材料として、誘電率異方性が負の液晶材料を用いる必要がある。本研究では、次節以降、ねじれネマチック液晶や IPS などで使用実績が多い誘電率異方性が正の液晶材料を用いる視野角制御素子について検討した結果を述べる。

表 5-1 視野角制御技術の分類

方式		構造	概要	有機ELディスプレイへの適用可否
バックライト 光指向性制御	光散乱制御方式 (散乱・透過制御)		高指向性バックライトと光散乱制御素子を組合せて、バックライト射出光の指向性を制御	否
	光源切替方式		高指向性と低指向性のバックライトを積層し、各バックライトの光源の点灯、消灯を切替えることでバックライト射出光の指向性を制御	否
液晶パネル内 位相差制御			画素内を領域分割、または、視野角制御電極を別に設けて液晶パネル内の液晶で斜め方向のコントラスト比のみを制御する	否
視野角制御素子			液晶パネルの上下のどちらかに、斜め方向の透過率のみを制御する視野角制御素子を設けて制御する	可

5.3 視野角制御素子の検討

5.3.1 視野角制御機能付きディスプレイの構造

図 5-1 に視野角制御機能付きディスプレイの構造を示す。本研究では、液晶ディスプレイ及び有機 EL ディスプレイに適用可能な方式として視野角制御素子方式を検討する。この際、モバイル機器に搭載される液晶ディスプレイと有機 EL ディスプレイが共に画像光が偏光であることから、偏光制御技術を活用し、画面上に配置することで機能する視野角制御素子を開発する。

視野角制御素子は液晶セルと偏光板とから構成される。また、視野角制御素子に必要な機能は、正面方向に進む光に対しては何ら変化を与えることなく、特定の斜め方向に進む光のみを遮断する状態と透過する状態とに任意に切り替えられることである。視野角制御素子を斜め方向に進む光が遮断される状態と透過する状態は、それぞれディスプレイの狭視野角状態と広視野角状態に対応する。さらにこの切り替えの際、正面方向では何ら光学的な変化が生じないこと、つまり明るさや色合いが変化しないことが必要である。

このような視野角制御素子を実現するには、以下の 2 点を満足する必要がある。

- ① 液晶層に電圧を印加しても正面方向の透過率が変化しないこと。つまり、液晶層への電圧印加の有無に関わらず、正面方向では常に光の状態が変化しないこと。
- ② 液晶層に印加する電圧によって、斜め方向(特定の方位角及び極角方向)に進む光が遮断される状態と透過する状態とに切り替えられること。

①を満足するには正面方向から観察した場合の液晶分子の配向方向が偏光板の吸収軸と平行もしくは直交しており、さらに縦電界駆動(液晶層の厚み方向に電界がかかる駆動)の構造とすればよい。さらに②を満足するには、液晶セルを斜めに通過する光に対し、実質的に位相差が生じない状態と、 $1/2$ 波長の整数倍の位相差が生じる状態を、縦電界駆動される液晶分子の配向状態により実現できる構造にすればよい。このような構造を実現する液晶セルとしては、正の誘電率異方性を有する液晶材料の使用を前提にすると、平行配向の液晶セル、あるいはハイブリッド配向の液晶セルの適用が考えられる。なお、ねじれ配向の液晶セルでも正面方向に進む光に対して何ら変化を与えることなく、特定の斜め方向に進む光を遮断する状態と透過する状態とに任意に切替えることが可能である。しかし、ねじれ配向の場合は光の透過率を制御できる特定の斜め方向が一方方向に限られる。このため、例えば左右二方向からの覗き見を防止するには液晶分子の配向方向を面内で分割する必要がある。さらに配向分割をしても画面の半分に相当する面積では画像がそのまま透過するため、画像の視認性を下げて覗き見を抑制するには、チェッカーパターン状に配向分割する

などの工夫を要する²⁾。本研究では液晶の配向分割をしなくても、左右二方向の透過率を制御できる視野角制御素子として平行配向及びハイブリッド配向の場合について検討を行った。

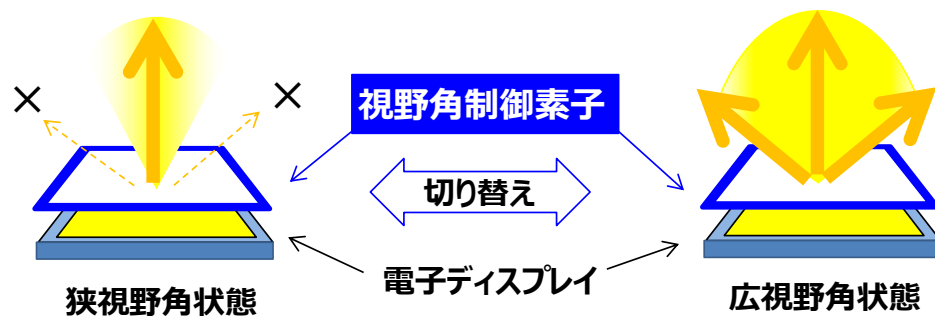


図 5-1 視野角制御機能付きディスプレイの構造

5.3.2 シミュレーション及び実験方法

視野角制御素子の光学シミュレーションは、液晶の連続弾性体理論に基づく光学計算ソフト (LCD Master, シンテック株式会社製) により行った。図 5-2 及び図 5-3 は、視野角制御素子の計算モデルを示し、図 5-2 が平行配向、図 5-3 がハイブリッド配向の場合を示す。視野角制御素子は二枚の偏光板(そのうち一枚は液晶パネルの表側の偏光板、もしくは有機 EL ディスプレイの円偏光板と兼用)と、その間に配置する液晶セルから構成される。二枚の偏光板の吸収軸は互いに平行となるように配置し、平行配向の液晶分子の配向方向(以下、配向軸とも呼ぶ)は、これと平行または直交するように設定する。本論文では偏光板の吸収軸と液晶分子の配向軸を方位角 $\phi = 90^\circ$ (270°) とした場合の結果を次節で述べる。シミュレーションに用いる液晶材料の物性値を表 5-2 に示す。この物性値は後述の実験で使用した液晶材料の値である。また、液晶分子のプレチルト角(基板面からの仰角)はラビングによる配向処理を想定して 3° とした。また、偏光板についてはトリアセチルセルロース (Triacetylcellulose:以下、TAC と略す) からなる保護フィルムを $R_{th} = -50 \text{ nm}$ のネガティブ C プレートとして考慮した。計算パラメーターは平行配向の場合は、液晶層の厚さ d_{LC} と駆動電圧とする。ハイブリッド配向の場合は液晶層の厚さ d_{LC} と駆動電圧のほか、ネガティブ C プレートの R_{th} の値を加える。これは、ハイブリッド配向の場合には後述する理由から、偏光板の保護フィルムである TAC 以外に、意図的にネガティブ C プレートを付加する必要があるからである。

視野角制御素子の視野角特性(全方位の輝度分布)の測定は、液晶ディスプレイの画面上に視野角制御素子を配置した状態で、視野角特性評価装置(EZ-contrast, ELDIM 社製)を用いて行った。

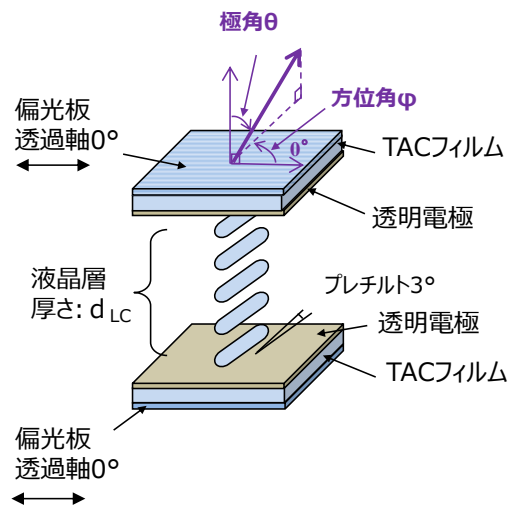


図 5-2 視野角制御素子の計算モデル-平行配向

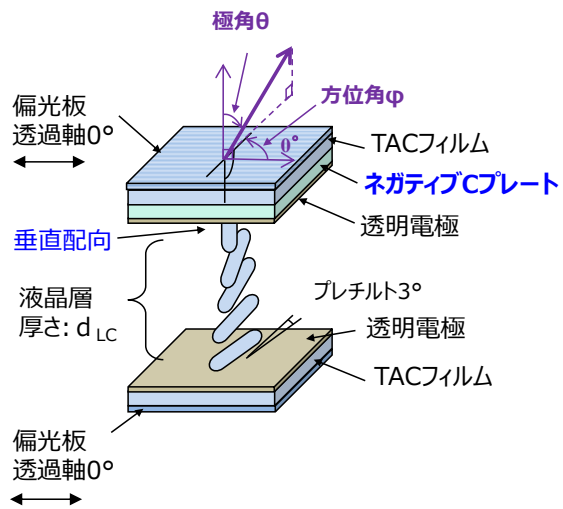


図 5-3 視野角制御素子の計算モデル-ハイブリッド配向

表 5-2 液晶材料の物性

$\Delta\epsilon$ (誘電率異方性)	Δn (屈折率異方性)	弾性定数		
		k_{11} (広がり変形)	k_{22} (ねじれ変形)	k_{33} (曲がり変形)
5.2	0.094	13.2	6.5	18.3

5. 4 視野角制御素子の検討結果

5. 4. 1 平行配向素子の検討

図 5-4 から図 5-7 は平行配向の液晶セルを用いた視野角制御素子(平行配向素子)のシミュレーション結果である。図 5-4 から図 5-7 は順に液晶層の厚さが $5\mu\text{m}$ 、 $6\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ の場合を示し、図中 (A)は液晶の駆動電圧 0V の場合の等透過率線図、(B)は斜め方向において最小の透過率となる液晶の駆動電圧における等透過率線図、(C)は駆動電圧 0V の場合の透過率 (A)を、斜め方向において最小の透過率となる駆動電圧での透過率 (B)で除した等コントラスト比線図を示す。なお、等透過率線図は透過率の最小値を 0 (0\%) として、 0.05 (5\%) 間隔で表示し、等コントラスト比線図は最小値を 1 として、 10 間隔で表示した。

平行配向素子の場合、初期配向状態(駆動電圧 0V)は IPS と同じ配向状態であり、同じ原理で広視野角となる。なお、上下方向(方位角 $\phi = 90^\circ$ 、 270° 方向)と比較して、左右方向(方位角 $\phi = 0^\circ$ 、 180° 方向)の方がやや広い範囲で透過率が高くなっている。これは斜め方向に進む光の界面での透過率の大きさがフレネルの式から導き出されるとおり、p偏光とs偏光で異なることに起因する。液晶セルの電極に駆動電圧を印加して、液晶層に適切な電界を与えると、液晶分子が立ち上がる。この際、液晶層を斜め方向に進む光には液晶層の複屈折性に応じた位相差が生じ、その偏光状態が変化して上側の偏光板で吸収されるようになる。つまり、斜め方向に進む光の透過率が低下して視野角を狭くすることができるようになる。この作用が得られる方向は液晶分子の配向軸と直交する二つの領域となる。すなわち、視野角制御が可能な範囲は液晶分子の配向軸に対し、線対称となる二つの領域となり、液晶層の厚さ d_{LC} によらず、方位角 $\phi = 0^\circ$ 、 180° 方向及びその周辺に限定される。

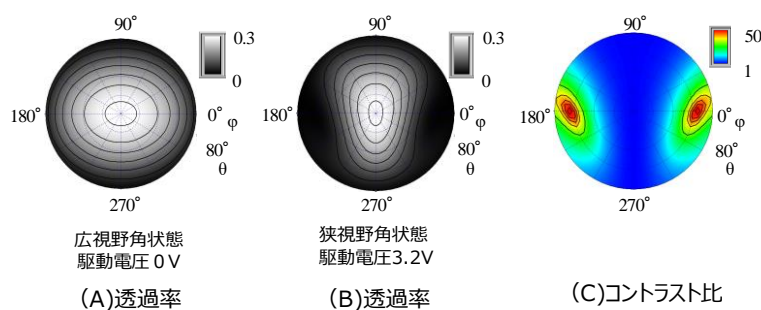


図 5-4 視野角特性の計算値(平行配向, 液晶層厚 $5\mu\text{m}$)

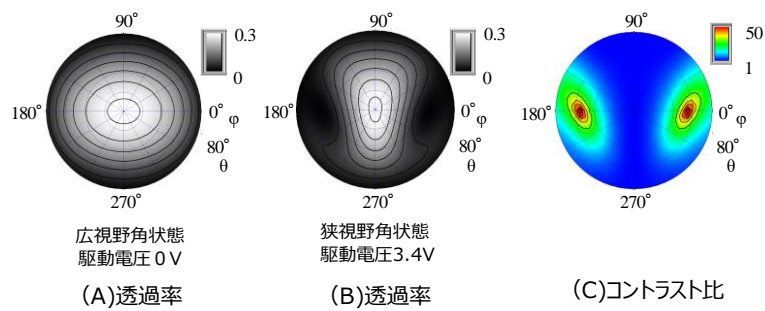


図 5-5 視野角特性の計算値(平行配向, 液晶層厚 $6 \mu\text{m}$)

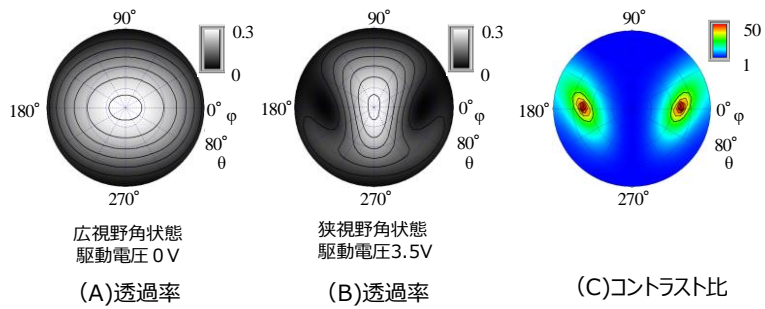


図 5-6 視野角特性の計算値(平行配向, 液晶層厚 $7 \mu\text{m}$)

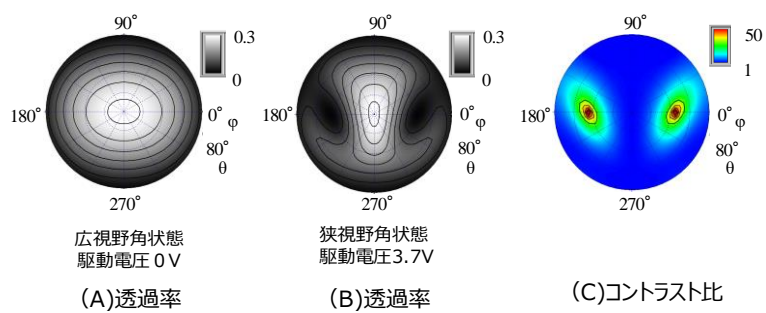


図 5-7 視野角特性の計算値(平行配向, 液晶層厚 $8 \mu\text{m}$)

図 5-8 は平行配向素子の透過率の角度依存性を示し、液晶層の各厚さにおいて斜め方向の透過率が最小となる状態、すなわち狭視野角状態となる駆動電圧における方位角 $\phi = 0^\circ$ 方向の視野角特性を示す。なお、極角 θ は方位角 $\phi = 0^\circ$ 方向を+とし、反対側(180° 方向)を-とする。液晶層の厚さ d_{LC} が大きくなると、透過率が最小となる角度が小さくなる。ここで、覗き見を抑制するために必要な視野角はディスプレイの使用環境や用途により異なるが、覗き見防止用フィルム（ルーバフィルム）としては角度（極角）が $\pm 24^\circ \sim \pm 60^\circ$ 以上になると画像光を遮光するものが市販されている。また、過去の製品（視野角制御機能付きの携帯電話）を 1 台、実測したところ、透過率が最小となる角度は $\pm 52^\circ$ であった。本来、覗き見を抑制するために必要な視野角は用途に応じて目標値を設定する必要があるが、本開発では上記状況を鑑み、透過率が最小となる角度の暫定目標値を $\pm 50^\circ$ とした。

図 5-8 から本検討の条件において透過率が最小となる角度を $\pm 50^\circ$ にするには、液晶層の厚さ d_{LC} を $7\mu m$ 程度にすれば良いことがわかる。なお、平行配向素子では透過率が最小となる角度よりも大きな角度になると透過率が高くなるという現象が現れる。つまり、透過率が最小となる角度よりも大きな角度範囲では光漏れが生じ、視野角制御可能な角度範囲が限定される。

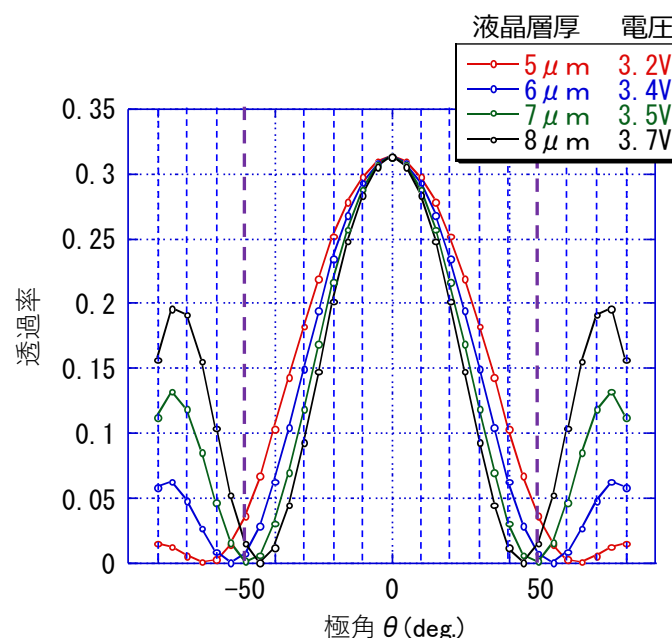


図 5-8 狭視野角状態の透過率の角度依存性の計算値(平行配向, 方位角 $\phi = 0^\circ$)

以上の結果から、平行配向素子では以下の二つの観点から視野角制御できる範囲が限定的であることが判明した。

- ① 液晶分子の配向軸と直交する方位(方位角 $\phi = 0^\circ$ 、 180°)からずれた方位では視野角を十分に制御できない。
- ② 透過率が最小になる角度(極角)よりも、さらに大きな角度では光漏れを生じて、視野角を十分に制御できない。

図 5-9 は①の原因に関する説明図である。液晶層に電界が印加されると、液晶分子はその分子長軸の方向が垂直方向に傾く。平行配向素子では、方位角 $\phi = 0^\circ$ 及び 180° の方向、すなわち液晶分子の配向軸と直交する方位であって、さらに特定の極角において液晶層に入射する直線偏光の偏光軸と液晶分子長軸との角度の差が 45° になると屈折率差が最大となり、位相差も大きくなる。液晶層を通過する光はこの位相差によって偏光状態が変化するが、この位相差が $1/2$ 波長になれば液晶層を通過する光は上側の偏光板で吸収されて透過率が最小になる。一方、例えば上記と同じ極角で方位角 $\phi = 45^\circ$ の方向に進む光に着目すると、電界の印加により液晶分子が垂直方向に傾いていても、入射光の偏光軸と液晶分子長軸との角度の差が 45° からずれる。さらに液晶分子が傾いていることで、入射光に作用する実効的な屈折率差が小さくなる。このため、この方向に進む光には十分な位相差が生じず、偏光状態がほぼ維持されるため、液晶層を通過した光は上側の偏光板を透過する。このように液晶分子の配向軸に直交する方位からずれた方向では、入射光の偏光軸と液晶分子長軸との角度の差が 45° からずれるなどして、液晶層を通過する光に十分な位相差が生じず、透過率を下げるできないため、視野角を十分に制御できない。

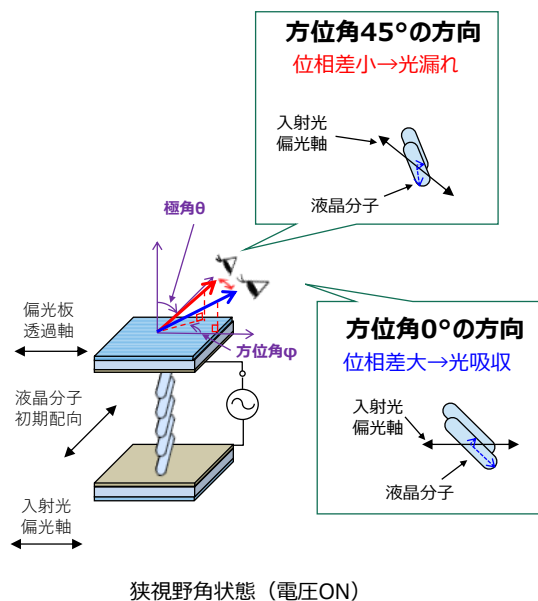


図 5-9 平行配向素子の場合に方位角方向の視野角制御範囲が狭い理由の説明図

図 5-10 は②の原因に関する説明図である。上述のとおり、液晶層に電界が印加されると、液晶分子が垂直方向に傾く。方位角 $\phi = 0^\circ$ 方向において入射光の偏光軸と液晶分子長軸との間の角度差が 45° になる特定の極角では屈折率差が最大となり、位相差も大きくなる。その位相差が $1/2$ 波長になると液晶層を通過した光は上側の偏光板で吸収される。光の進む角度がこの極角よりも大きくなると、入射光の偏光軸と液晶分子長軸とがなす角度は小さくなる。このため、液晶層を通過する光に対する実効的な屈折率差が減少し、位相差も小さくなるため上側の偏光板での吸収が減り、光が漏れることになるため、視野角を十分に制御できない。

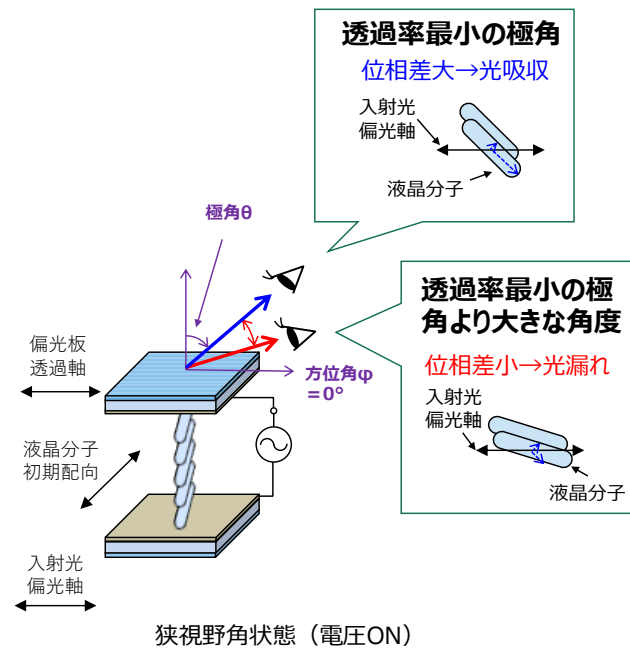


図 5-10 平行配向素子の場合に極角方向の視野角制御範囲が狭い理由の説明図

5. 4. 2 ハイブリッド配向素子の検討

前項において、平行配向素子の場合に視野角制御範囲が狭くなる原因を、方位角方向と極角方向とに分け、それぞれ述べた。そこで、平行配向素子と同様に、誘電率異方性が正の液晶材料を用いることを前提として、視野角制御範囲を拡大する方法として、ハイブリッド配向の液晶セルとネガティブ C プレートを組み合わせた新方式の視野角制御素子(ハイブリッド配向素子)を考案した³⁾⁸⁾⁹⁾。図 5-11 にそのコンセプトを示す。

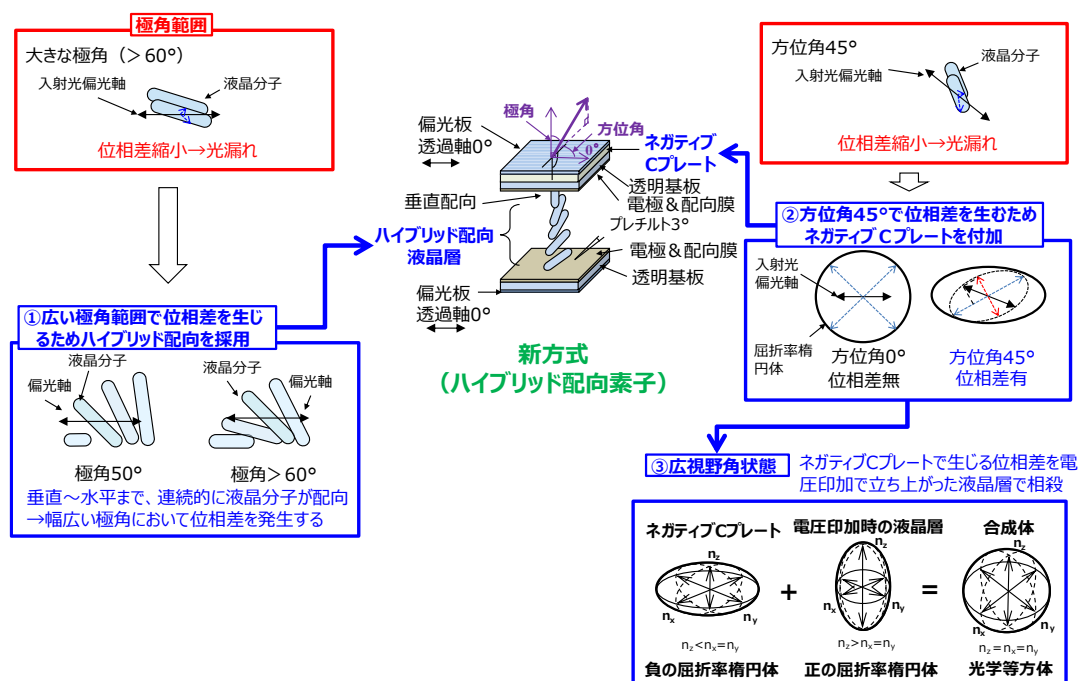


図 5-11 視野角制御範囲拡大のコンセプト

図 5-11 に示すとおり、視野角制御範囲の拡大に際し、以下の3つのコンセプトを導入した。

- ① 極角の制御範囲を広げるため、ハイブリッド配向を採用する。
- ② 方位角の制御範囲を広げるため、液晶の水平配向軸に直交する方位 ($\phi = 0^\circ$ 、 180°) 以外の方位において位相差を発生させるネガティブ C プレートを導入する。
- ③ 広視野角状態は、ネガティブ C プレートで発生する位相差を電圧印加により立ち上がった液晶層で相殺し、補償することで実現する。

平行配向素子の場合は透過率が最小となる極角よりも角度が大きくなると、入射光の偏光軸と液晶分子長軸との角度が 45° より小さくなり、位相差が縮小して光漏れが生じる。①は、これを避けるための構造である。具体的には液晶分子の初期配向方向を、一方は基板に対してはほぼ垂直と

し、他方は基板に対しほぼ平行とするハイブリッド配向とする。この場合、液晶層に電圧を印加しない、もしくは小さな電圧を印加した状態では、液晶分子はその分子長軸の方向が基板面に対し垂直な方向から平行な方向まで、その弾性定数に応じて連続的に配向する。このため、幅広い極角範囲で液晶層を通過する光に位相差を発生させ、透過率を下げる事が可能になる。

また平行配向素子の場合、方位角が 0° 及び 180° 、すなわち液晶の配向軸に直交する方位からずれると、入射光の偏光軸と液晶分子長軸とがなす角度が 45° からずれて実効的な屈折率差が小さくなり、位相差が減少して光漏れが生じる。②は液晶層による位相差が小さくなる方位においても、位相差を発生させるための施策である。ネガティブ C プレートは、面内方向には位相差がないため、正面方向に進む光には何も作用しない。また、方位角 $\phi = 0^\circ$ 、 180° 、 90° 及び 270° の方位に斜め方向に進む光に対しても入射光の偏光軸に対しては位相差は生じないが、方位角 ϕ がこれらの角度からずれると、入射光の偏光軸に対し、屈折率の異方性が現れて位相差を生じる。この位相差によって透過率を下げる事が可能になる。

①及び②の構造によって、より広い角度範囲において狭視野角状態を実現することが可能になる。この構造において、広視野角状態を実現する方法が③の施策である。ネガティブ C プレートは特定の斜め方向に進む光に対して常に位相差を生じる。そこで液晶層に高い電圧を印加して液晶分子を垂直方向に立たせることでポジティブ C プレートの状態を実現し、ネガティブ C プレートで生じる位相差を相殺することで広視野角状態の実現を図る。

図 5-12 から図 5-15 はハイブリッド配向素子のシミュレーション結果である。図 5-12 から図 5-15 はそれぞれ液晶層厚が $11\mu\text{m}$ 、 $14\mu\text{m}$ 、 $17\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ の場合を示す。また、図中 (a) は駆動電圧 0V の場合の等透過率線図、(b) は斜め方向において最小の透過率となる駆動電圧における等透過率線図、(c) は駆動電圧 10V の場合の等透過率線図、(d) は、駆動電圧 10V の場合の透過率 (c) を斜め方向において最小の透過率となる駆動電圧での透過率 (b) で除した等コントラスト線図を示す。なお等透過率線図は図 5-4 から図 5-7 と同様、透過率の最小値を 0 (0\%) として、 0.05 (5\%) 間隔で表示し、等コントラスト線図は最小値を 1 として、 10 間隔で表示した。

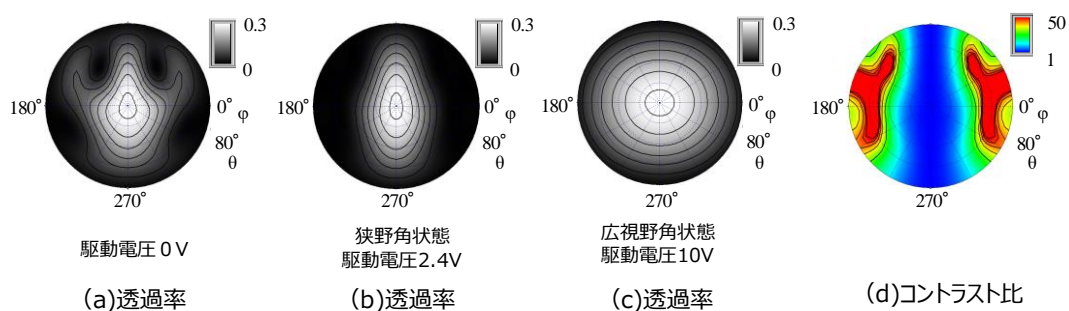


図 5-12 視野角特性の計算値(ハイリット配向, 液晶層厚 $11 \mu\text{m}$, ネガティブ C プレート $R_{\text{th}} = -900\text{nm}$)

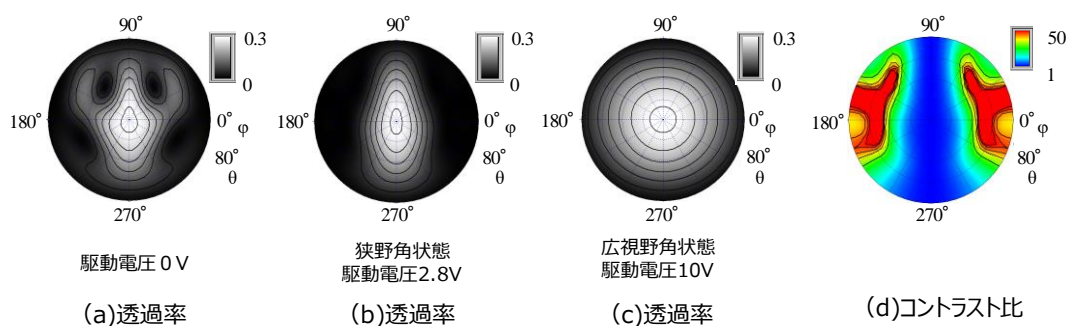


図 5-13 視野角特性の計算値(ハイリット配向, 液晶層厚 $14 \mu\text{m}$, ネガティブ C プレート $R_{\text{th}} = -1150\text{nm}$)

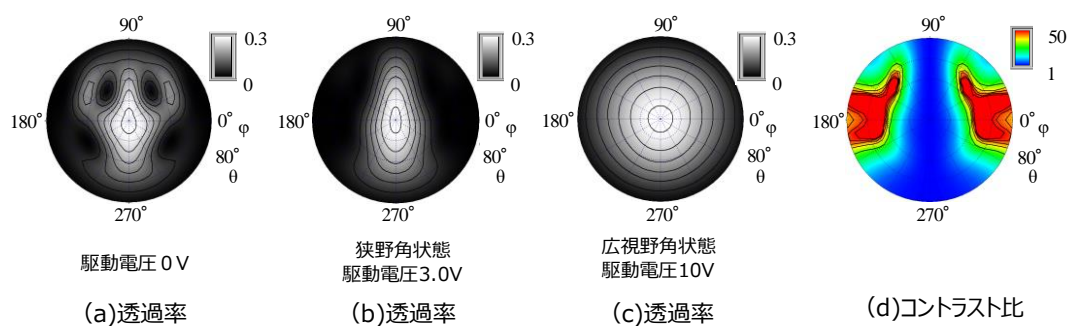


図 5-14 視野角特性の計算値(ハイリット配向, 液晶層厚 $17 \mu\text{m}$, ネガティブ C プレート $R_{\text{th}} = -1400\text{nm}$)

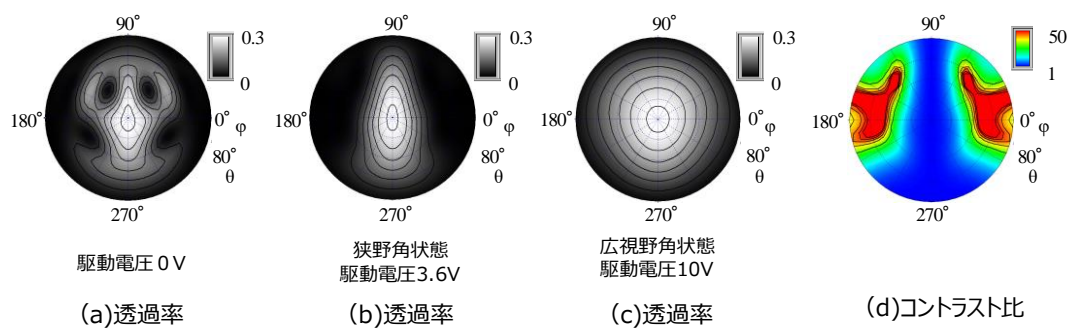


図 5-15 視野角特性の計算値(ハイフリット'配向, 液晶層厚 $20\mu\text{m}$, ネガティブ' C プレート $R_{\text{th}} = -1650\text{nm}$)

ハイブリッド配向素子の場合、液晶分子が初期配向の状態(駆動電圧 0V)において、斜め方向に進む光に位相差が生じる。このため、液晶層の厚さとネガティブ C プレートの R_{th} に応じた角度において透過率が低くなる領域が存在する。ここで、視野角制御により覗き見抑制を実現することを念頭におくと、画面の下方方向は観察者(持ち主)自身が遮蔽物になるため、覗かれる可能性は少ない。覗き見され易い方向は左右方向及びその上方と考えられるため、視野角を制御すべき方向は画面を観察する状態において、左右方向及びその上方にその制御範囲が広がっていることが望ましい。

図 5-12 から図 5-15 からわかるように、初期配向状態(駆動電圧 0V)においても透過率が低くなっている角度領域はあるが十分ではない。左右方向を中心とするより広い角度範囲の透過率を低下させるには液晶の配向状態を調整する必要がある。液晶の配向状態を調整する方法としては、液晶のアンカリング強度やプレチルト角、液晶材料の弾性定数等をパラメーターとして適切な条件を選ぶ、ということが考えられるが、材料のバリエーションには限りがあり、最適な物性値の材料を実現することは容易ではない。そこで、適切な駆動電圧を印加し、電界によって液晶の配向状態を所望の状態に変化させることを検討した。図中 (b)はその結果、得られた条件(駆動電圧)における等透過率線図に相当する。ハイブリッド配向素子の場合、適切な駆動電圧を印加すると液晶層の配向状態を起因とする位相差及びネガティブ C プレートにより生じる位相差によって、液晶配向軸(水平配向軸)と直交する方位を中心とする幅広い角度範囲において透過率を下げる事が可能になる。

一方、広視野角状態は、液晶層に高い電圧を印加して液晶分子を基板面に対し垂直方向に立たせることでポジティブ C プレートの状態を実現し、ネガティブ C プレートで生じる位相差を相殺し、補償することで実現する。シミュレーションの結果、ネガティブ C プレートの R_{th} の絶対値が、液晶層の厚さ d_{LC} と液晶の $\Delta n (=0.094)$ の積の 95%程度の値(数値は各図のタイトルに記載)のときに全方位においてほぼ均等に高い透過率が得られた(偏光板の TAC フィルムの R_{th} も含む)。

図 5-16 はハイブリッド配向素子の透過率の角度依存性を示し、液晶層の各厚さにおいて斜め方向の透過率が最小となる状態、すなわち狭視野角状態となる駆動電圧における方位角 $\phi = 0^\circ$ 方向の視野角特性を示す。液晶層厚が大きくなると、透過率が最小となる角度は小さくなる。透過率が最小となる角度を暫定目標値である $\pm 50^\circ$ とするには液晶層の厚さを $14 \mu m$ 程度にすれば良いことがわかる。また、平行配向素子(図 5-8)と比較すると、透過率が最小となる角度より大きな極角においても透過率の上昇が低く抑えられることがわかる。つまり、ハイブリッド配向素子ではハイブリッド配向の採用によって、より広い極角範囲において視野角の制御が可能となる。

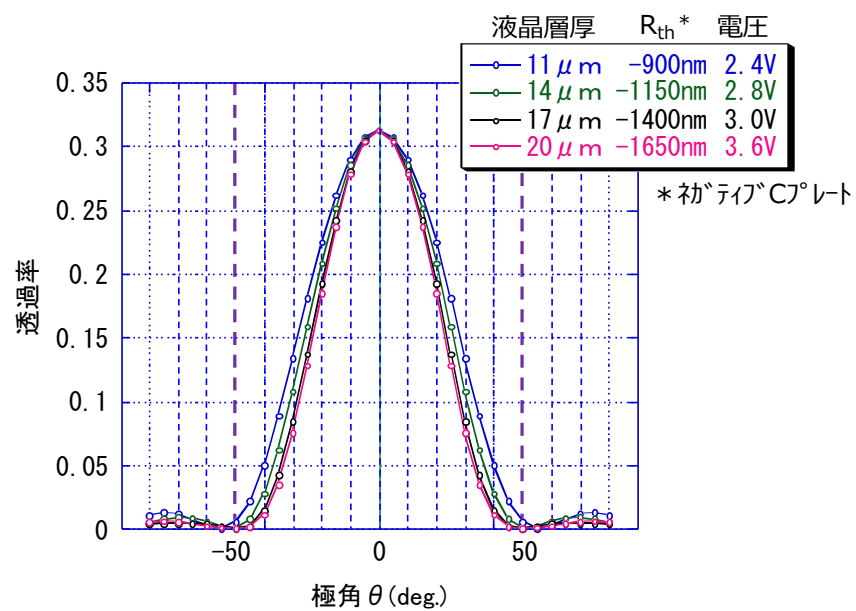


図 5-16 狭視野角状態の透過率の角度依存性の計算値(ハイブリッド配向, $\phi = 0^\circ$)

5. 4. 3 評価結果

図 5-17 に視野角制御素子を備える電子ディスプレイの断面概略図を示す。また、表 5-3 に試作したハイブリッド配向素子の仕様を示す。図示のとおり、ハイブリッド配向素子を IPS 液晶ディスプレイと組み合わせることで視野角制御機能を備える電子ディスプレイを構成し、評価した。なお本試作では視野角制御素子の透明基板としてガラス基板を用いた。また、液晶層の厚さを決めるスペーサービーズとネガティブ C プレートは、試作時点で入手可能な部材を用いたため、必ずしも最適な条件とはなっていないが、設計思想の検証に支障はないと考える。

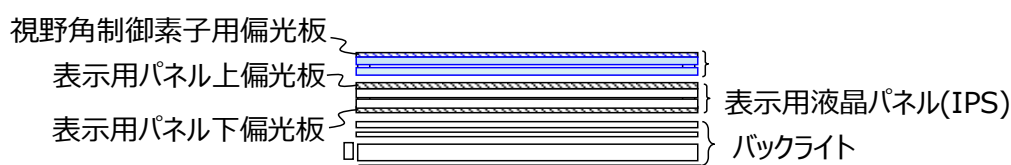


図 5-17 視野角制御機能を備える電子ディスプレイの断面概略図

表 5-3 視野角制御素子の仕様

液晶層厚	ネガティブ C プレートの R_{th}
15 μ m	-1064nm

図 5-18 に試作品の評価結果を示す。図中 (a) は狭視野角状態 (液晶駆動電圧 $\pm 2.7V$) の輝度分布 (等輝度線図) を示し、(b) は方位角 $\phi = 0^\circ$ 方向の輝度の角度 (極角) 依存性を示し、(c) は広視野角状態 (液晶駆動電圧 $\pm 8.5V$) の輝度分布 (等輝度線図) を示す。いずれの図も最大輝度で規格化した値で示しており、(a)(c) の等輝度線図は 0.0625 間隔で表示している。なお広視野角状態はより高い駆動電圧で実現することが望ましいが、ここでは既存の電源で対応できる 8.5V で評価を行った。狭視野角状態では、方位角 $\phi = 0^\circ$ 方向において、極角がほぼ $\pm 50^\circ$ で輝度が最小となり、それより大きな角度においても低い輝度を維持している。また、方位角 $\phi = 45^\circ$ (135°) 方向でも輝度が低くなっており、より広い角度範囲で視野角制御を実現できることを確認した。

図 5-19 に試作品の画面の写真を示す。それぞれ、狭視野角状態と広視野角状態において、正面方向、斜め横方向、斜め上方向から撮影した写真を示す。広視野角状態では、IPS の広視野角な特性が活かされるため、斜め方向から観察しても、正面方向から観察する場合と遜色の無い画質が得られている。一方、狭視野角状態では、正面方向から観察する画像は広視野角状態と全く変

わからないが、斜め方向では、斜め横方向及び斜め上方向において画像が暗くなり、視認性が悪くなることで覗き見抑制の効果が得られていることがわかる。

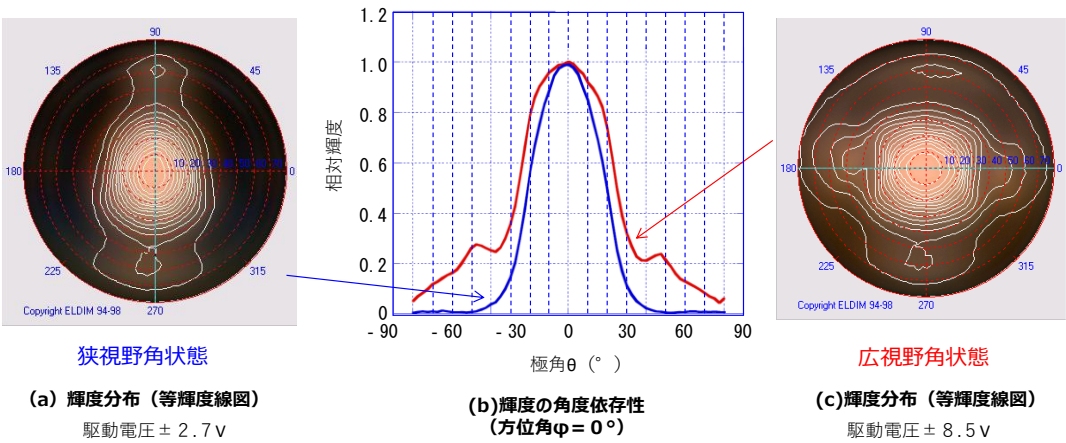


図 5-18 視野角制御機能を備える電子ディスプレイの評価結果

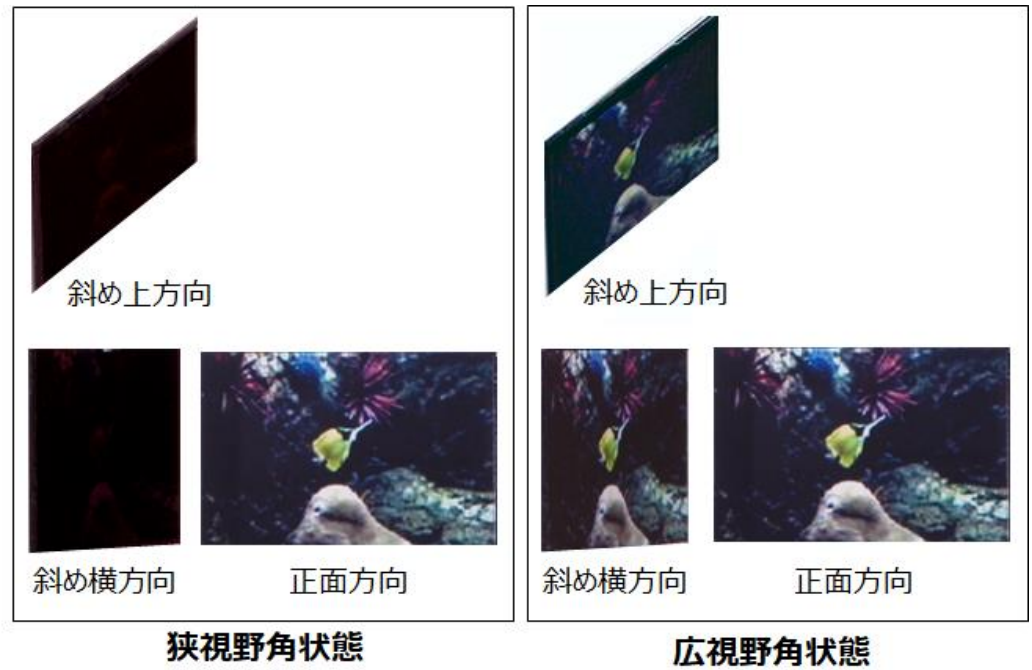


図 5-19 視野角制御機能を備える電子ディスプレイの画面写真

図 5-20 にハイブリッド配向素子と平行配向素子の視野角制御範囲を示す。同図は、実測した広視野角状態の輝度を狭視野角状態の輝度で除すことで得られるコントラスト比に基づく等コントラスト比線図である。例えば、コントラスト比が 10 以上となる範囲を片側(方位角 0° を含む方向)で比較すると、平行配向素子では、極角が $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ (角度範囲 15°)、方位角が $-12^{\circ} \sim 12^{\circ}$ (角度範囲 24°) の角度範囲であるのに対し、ハイブリッド配向素子では、極角が $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$ (角度範囲 40°)、方位角が $-20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ (角度範囲 80°) と、極角範囲で 2.5 倍以上、方位角範囲で 3 倍以上のより広い角度範囲を制御できることが確認できた。

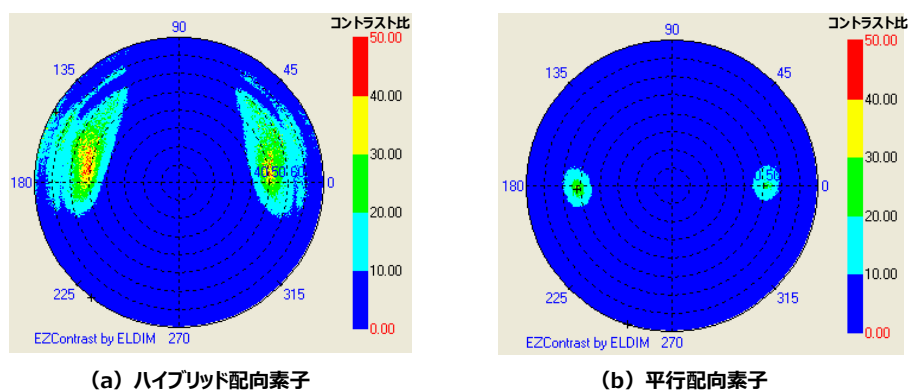


図 5-20 視野角制御範囲の比較-等コントラスト比線図

なおハイブリッド配向素子ではその視野角制御範囲が上方向(方位角 90° の方向)に偏っている。図 5-21 に本試作品の試作条件における視野角制御範囲のシミュレーション結果を示す。同図は表 5-3 に示す条件で計算した広視野角状態の透過率を狭視野角状態の透過率で除すことで得られるコントラスト比に基づく等コントラスト比線図である。計算からも本試作条件では、視野角制御範囲が上方向(方位角 90° の方向)に広がる傾向があることがわかる。なおシミュレーション結果に対し、実測値のコントラスト比は低くなっているが、これは以下の理由によると考えられる。

- ①試作品では、液晶層の厚さをスペーサービーズで確保している。スペーサービーズの周りでは液晶分子の配向が乱れる。液晶分子の配向が乱れると広視野角状態では透過率の低下、狭視野角状態では透過率が上昇するため、コントラスト比が低下する。

②極角が大きくなると偏光板と空気などの屈折界面における反射が大きくなる。実測ではこのような界面反射によって液晶ディスプレイ側に戻り、再び表側に出てくる光も検出されるが、シミュレーションではこのような迷光が考慮されていない。

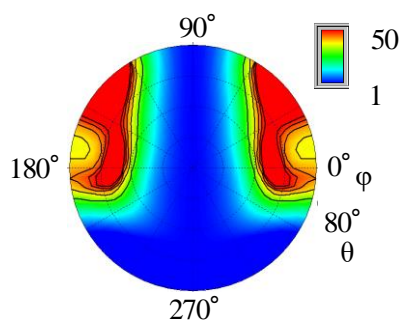


図 5-21 ハイブリッド配向素子(本試作条件)の等コントラスト比線図の計算値
(液晶層厚 $15\mu\text{m}$, ネガティブ C プレートの $R_{th}=-1064\text{nm}$)

5.5 まとめ

視野角の動的制御を実現するため、液晶の複屈折による偏光状態変化を利用して、正面方向は何も変化しない状態で斜め方向のみ任意に透過率を変えることができる外付けの視野角制御素子を検討した。具体的には従来の技術である平行配向素子において視野角制御範囲が狭い原因を特定し、以下の対策構造を備える新方式(ハイブリッド配向素子)を考案した。

①極角の制御範囲

原因:狭視野角状態において、入射光の偏光軸と液晶分子長軸との角度の差が、特定の極角以外では 45° からずれて位相差が縮小して光漏れが生じる。

対策:より幅広い極角範囲で位相差を発生させるため、ハイブリッド配向を採用する。

②方位角の制御範囲

原因:液晶の配向軸に直交する方位からずれると、入射光の偏光軸と液晶分子長軸との角度差が 45° からずれて、位相差が縮小して光漏れが生じる。

対策:液晶の配向軸に直交する方位以外の方位において位相差を発生させるためにネガティブ C プレートを導入する。

③広視野角状態

②の対策で導入したネガティブ C プレートで発生する位相差を、電圧印加により立上がった液晶層によって相殺し、補償することで広視野角状態を実現する。

ハイブリッド配向素子を試作・評価した結果、平行配向素子と比較して極角範囲が 2.5 倍以上、方位角範囲が 3 倍以上とより広い角度範囲を制御できることを確認した。ハイブリッド配向素子はより広い角度範囲の透過率を制御できるため、広視野角な IPS 液晶ディスプレイや有機 EL ディスプレイに好適である。また、面内にルーバーフィルムの様な周期構造が無いため、どのような解像度のディスプレイと組み合わせてもモアレによる画質劣化の懸念がないという特徴がある。

今後、透明基板をフィルム化し、薄型・軽量化を進めることで、モバイル機器への採用が進むものと期待する。

参考文献

- 1) Y. Hisatake, Y. Kawata and A. Murayama, “Viewing Angle Controllable LCD using Variable Optical Compensator and Variable Diffuser”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **36**, 1218–1221 (2005).
- 2) K. Takatho and S. Kobayashi, “New Peeping Prevention Technology to Control Viewing Angle Properties of TFT-LCDs”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **37**, 1340–1343 (2006).
- 3) M. Adachi and M. Shimura, “Controllable Viewing-Angle Displays using a Hybrid Aligned Nematic Liquid Crystal Cell”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **37**, 705–708 (2006).
- 4) K. W. Chien, Y. J. Hsu and H. M. Chen, “Dual Light Source for Backlight Systems for Smart Viewing-Adjustable LCDs”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **37**, 1425–1427 (2006).
- 5) H. S. Jin, H. S. Chang, J. K. Park, S. K. Yu, D. S. Lee and I. J. Chung, “Novel Viewing-Angle Controllable TFT-LCD”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **37**, 729–731 (2006).
- 6) K. Hiyama, R. Ogawa, T. Ishinabe, and T. Uchida, “Design of High Performance Viewing-Angle-Controllable LC Panel,” Proc. IDW’06, 217–219 (2006).
- 7) 小川涼、檜山甲太、石鍋隆宏、内田龍男、「高性能視野角制御液晶パネルの設計」、信学技報、**106**(499)、85–88 (2007).
- 8) 足立昌哉、「ハイブリッド配向ネマチック液晶を用いた視野角制御技術」、信学技報、**106**(499)、113–116 (2007).
- 9) M. Adachi, “Controllable-Viewing-Angle Display Using a Hybrid Aligned Nematic Liquid-Crystal Cell”, Jpn. J. Appl. Phys. **47**(10), 7920–7925, (2008). [DOI: 10.1143/JJAP.47.7920]
- 10) W. I. Kim, E. J. Jeong, S. S. Kim, M. H. Chin, Y. J. Lim, K. U. Jeong and S. H. Lee, “Viewing Angle Switching of Liquid Crystal Displays Driven by Fringe Field Switching”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **40**, 1601–1603 (2009).
- 11) L. W. Liu, J.P. Cui, D. H. Li and Q. H. Wang, “A viewing-angle controllable blue-phase liquid-crystal display”, J. Soc. Inf. Disp. **20**(6), 337–340 (2012).
- 12) L. Wang, L. Jiang, Z. Su, Y. Qiao, P. Liao and S. Chung, “Viewing Angle Controllable LCD with Specified Array Structure for Ultra High Definition Display”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **49**, 1765–1768 (2018).
- 13) 「Report[FPD]～携帯電話機に搭載された視野角制御液晶 技術内容をシャープが明らかに」、日経マイクロデバイス 9 月号、68 (2005).
- 14) N. Aoki, S. Komura, T. Furuhashi, M. Adachi, O. Itou, T. Miyazaki and M. Ohkura, “Advanced IPS

- technology for mobile applications”, J. Soc. Inf. Disp. **15**(1), 23–29 (2007).
- 15) S. Aratani, M. Shimizu, M. Adachi, T. Sugita, T. Shibasaki and K. Shimazaki, “Collimated OLED Light Source with Patterned OLED and Microlens”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **39**, 2074–2076 (2008).
 - 16) J. L. Fergason, “Polymer Encapsulated Nematic Liquid Crystals for Display and Light Control Applications”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **16**, 68–70 (1985).
 - 17) T. Fujisawa, H. Ogawa and K. Mruyama, “Electro–Optic Properties and Multiplexibility for Polymer Network Liquid Crystal Display (PN-LCD)”, Proc. 9th Int. Disp. Res. Conf., 690–693 (1989).

第6章 総括

移動通信システムの進歩に伴いスマートフォンを代表とするモバイル機器を通じて、いつでもどこでもデジタル化された様々な情報や大容量の映像データにアクセスできる社会環境が実現しつつある。このような超高速通信環境において、モバイル機器に搭載される電子ディスプレイには、モバイル機器のバッテリーによる駆動時間を確保するための低消費電力化が必要と考えられる。また、公共の場でのプライバシーの確保と複数人で観賞できる利便性を両立する視野角の動的制御が必要になると考えた。ここで本研究の対象であるモバイル機器に搭載される液晶ディスプレイと有機 EL ディスプレイはいずれも光源から出射した自然光(ランダム偏光)が最終的には偏光板を透過して画像光として出射する。偏光はランダム偏光と比べると、比較的容易に制御することができる。そこで、本研究では偏光制御技術を活用し、液晶ディスプレイ及び有機 EL ディスプレイの光利用効率向上による低消費電力化と、両ディスプレイに適用可能な視野角の動的制御技術の実現について検討を行った。以下、本研究を総括する。

第1章では、研究の背景と目的および論文の構成を述べた。

第2章では、偏光の種類と定義及びその制御技術について分類、整理し、電子ディスプレイへの適応性を議論した。さらにモバイル機器に搭載する液晶ディスプレイ及び有機 EL ディスプレイの技術課題として、低消費電力化のための光利用効率の向上と視野角の動的制御を実現する視野角制御素子の開発を取り上げ、これら技術課題の解決に向けて適用する偏光制御技術と対策方法を明示した。具体的には、液晶ディスプレイの光利用効率向上については、屈折界面において p 偏光の透過率が s 偏光より高くなる条件(フレネルの式から求められる条件)を利用して、特定の偏光をより多く含む光を出射するように構成したバックライト(偏光バックライト)を開発し、偏光板での吸収損失の低減を図る。また、有機 EL ディスプレイの光利用効率向上については、三原色の中で有機 EL 素子の発光効率が最も低い青色に着目し、コレステリック液晶による円偏光の選択反射を利用した光リサイクル技術により青色光の偏光板による吸収損失の低減を目指す。さらに、視野角制御素子については、モバイル機器に搭載される電子ディスプレイの画像光が偏光であることを利用し、液晶の複屈折性による偏光状態変化によって正面方向には作用せず、斜め方向のみ任意に透過率を変えることができる外付けの視野角制御素子の実現を目指す。

第3章では、液晶ディスプレイの光利用効率向上のために開発した偏光バックライトについて述べた。偏光バックライトは、複雑な構造や特殊な部材を新たに導入することなく、バックライトを構成

する光学部材の各屈折界面において、p 偏光の透過率が s 偏光より高くなることを利用することを基本コンセプトとした。具体的には、以下の3項目を備えるバックライトを検討した。

- ①プリズムシートは、プリズム面を表側の面に備え、主光線がプリズム面に対しブリュースター角で入射するように非対称な断面形状のプリズムを採用する。
- ②プリムシートの裏面に p 偏光の透過率が高くなる条件で高屈折率膜を設ける。
- ③プリズムシートと指向性拡散シートの基材には、これを通過する光の偏光状態を維持するため、光学的に等方なフィルムを用いる。

①～③の要件を備えるバックライトを試作、評価した結果、従来の方式と比較して、p 偏光の正面輝度が 1.34 倍に向上することを確認した。この際、バックライトからの出射光は p 偏光度が 37%の部分偏光となっており、コンセプトどおりに p 偏光の割合が多い出射光を得られることを証明できた。このバックライトを液晶ディスプレイに採用した場合、同じ輝度であればバックライトの電力を約 30%低減できる見通しが得られた。また、本開発のバックライトは、特殊な部材や特別な構造を必要としないため、既存の生産設備で製造が可能である。さらに、より少ない部材で実現できることから、薄さやコストの面で優位性があると考えられる。

第 4 章では、三原色の中での有機 EL 素子の発光効率が最も低い青色に着目し、青色光の光利用効率向上による有機 EL ディスプレイの低消費電力化について検討した。具体的には円偏光板と有機 EL 素子との間に青色に選択反射の波長帯域を有するコレステリック液晶層を配置することで、従来、偏光板で吸収され損失となっていた青色光を偏光板で吸収される前にコレステリック液晶層で反射し、再利用する光リサイクル構造を考案し、その効果を検証した。実験の結果、光リサイクル効果により偏光板での吸収損失が低減し、青色のピーク波長 (466nm) において発光強度が 56% 向上することを確認した。一方、副作用として斜め方向から観察した際に外光反射が増加するという課題が判明した。反射増加の原因はコレステリック液晶層が光学的に負の屈折率楕円体として機能し、斜め方向に進む光に対して不要な位相差を発生させるためである。この対策として不要な位相差を相殺し、補償するため、光学的に正の屈折率楕円体として機能する位相補償層の導入を検討した。その結果、厚み方向の位相差 $R_{th}[(\text{面内方向の屈折率} - \text{厚み方向屈折率}) \times \text{厚さ}]$ の絶対値が、コレステリック液晶層より約 14% 高い位相補償層を設けることで、反射の増加を抑制できることを確認した。本方式によって青色の光利用効率が向上し、青色単色の有機 EL 素子の消費電力が 48%、白表示した場合の有機 EL 素子の消費電力が 17% 低減することを確認した。また、リサイクルされる光の波長帯域が有機 EL 素子の発光帯域より狭いため、青色の色度が改善し(刺激純度 71%→76%、主波長 480nm→477nm)、それに伴い色再現範囲が拡大した (NTSC 比 65%

→69%)。これらの効果は、発光材料や発光素子の構造を変えることなく得ることができる。さらに、画面上に精密な位置合わせを必要としないフィルム(コレステリック液晶層及び位相補償層)を付加するという比較的容易な方法によって実現できるという特長がある。

第5章では、液晶ディスプレイ及び有機ELディスプレイに共通して利用できる視野角の動的制御技術の開発について述べた。具体的には、モバイル機器に搭載される電子ディスプレイの画像光が偏光であることを利用して、液晶の複屈折性による偏光状態変化により、正面方向には何も作用せず、斜め方向のみ任意に透過率を変えることができる外付けの視野角制御素子を検討した。この際、従来の視野角制御素子(平行配向素子)は、現在、主流となっている広視野角な電子ディスプレイに対して視野角制御の範囲が十分ではないと考えた。平行配向素子の視野角制御範囲が限定される理由は、狭視野角状態において極角が大きい範囲や方位角が液晶配向方向に直交する方向からずれた角度において、入射光の偏光軸(入射偏光軸)と液晶分子長軸との角度差が 0° もしくは 90° に近づき、液晶層によって生じる位相差が縮小して光が漏れるためである。その対策として液晶分子の配向方向を片側の基板のみ基板面に対し垂直方向とするハイブリッド配向とし、さらに光学的に負の屈折率楕円体として機能する部材(ネガティブCプレート)を追加する方式を考案した。新方式(ハイブリッド配向素子)は狭視野角状態のとき、ハイブリッド配向とした液晶層とネガティブCプレートによって、幅広い角度範囲において位相差が発生し、透過率を下げることができる。また、広視野角状態はネガティブCプレートにより生じる位相差を、電圧印加によって基板面に対し垂直方向に立ち上がった液晶層の位相差で相殺することで実現する。シミュレーション結果を基に入手可能な部材によって設計条件に近いハイブリッド配向素子を試作した。具体的には、液晶層の厚さが $15\mu\text{m}$ 、厚み方向の位相差 R_{th} が -1064nm のネガティブCプレートから構成するハイブリッド配向素子を試作、評価した結果、平行配向素子と比較して極角範囲が2.5倍以上、方位角範囲が3倍以上とより広い角度範囲を制御できることを確認した。このような液晶セルを用いた視野角制御素子は、面内にルーバーフィルムのような周期構造が無く、どのような解像度のディスプレイと組合わせてもモアレによる画質劣化の懸念がないため、適用範囲が広いという特徴がある。

昨今の移動通信システムの高度化(超高速化、低遅延化、多数同時接続)により、いつでもどこでも大容量の情報にアクセスできる環境が整いつつある。このような環境においてモバイル機器に搭載される電子ディスプレイは、増大する情報を表示するために、今後、大画面化(フォルダブルやローラブルなどの形態の変化を含む)が進むと考えられる。電子ディスプレイが大画面化すると、それに伴う消費電力の増大や、画面を覗き見される懸念が高まることが予想される。図6-1に示すとおり

り、本研究で得られた成果、すなわち電子ディスプレイの低消費電力化を実現する光利用効率の向上技術と、視野角をより広い範囲で動的制御できる視野角制御技術は、今後、モバイル機器の電子ディスプレイの大画面化が進んだ際に予想される要請に対し、引き続き貢献できるものと考え

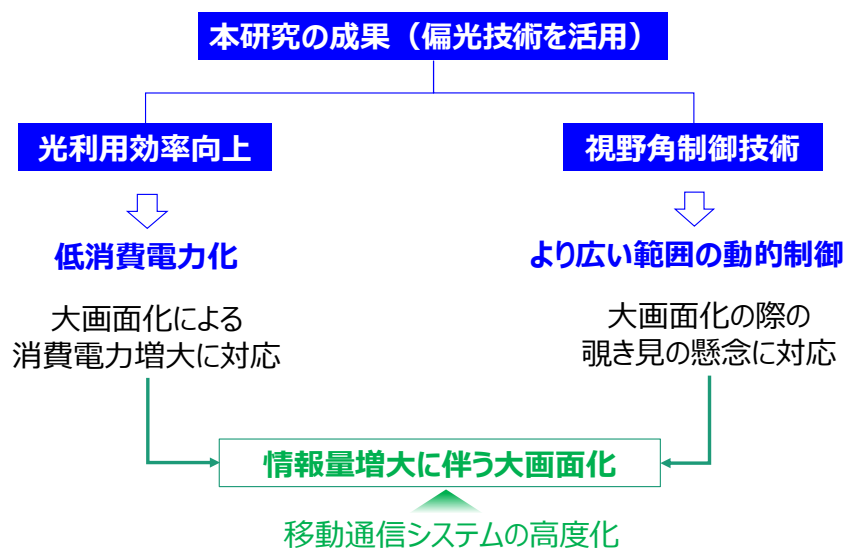


図 6-1 本研究の将来への発展性

本研究に関する業績

原著論文

- 1) M. Adachi, S. Aratani and K. Yanagawa, “Enhancement of blue-light-emission properties for OLED display by using a polarized light-recycling structure”, J. Soc. Inf. Disp. **16**(8), 875-881 (2008). [DOI: 10.1889/1.2966450]
- 2) M. Adachi, “Controllable-Viewing-Angle Display Using a Hybrid Aligned Nematic Liquid-Crystal Cell”, Jpn. J. Appl. Phys. **47**(10), 7920-7925 (2008). [DOI: 10.1143/JJAP.47.7920]
- 3) 足立昌哉、西澤重喜、島崎勝輔、「屈折界面において p 偏光透過率が高くなることを有効活用した高効率バックライト」、照明学会誌、第 104 巻 2 号、82-89 (2020).
[DOI: 10.2150/jiej.190000589]

国際会議発表

- 1) M. Adachi, S. Aratani and K. Yanagawa, “Light Out-Coupling Enhancement of OLEDs by a Polarized Light Recycling Structure”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **36**, 1285-1286 (2005).
- 2) M. Adachi and M. Shimura, “Controllable Viewing-Angle Displays using a Hybrid Aligned Nematic Liquid Crystal Cell”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **37**, 705-708 (2006).
- 3) Y. Shiraishi, S. Nishizawa, Y. Ogawa and N. Ishihara, “High Efficiency Backlight Effectively Using P-polarized Light”, SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **42**, 1423-1427 (2011).

国内学会発表

- 1) 足立昌哉、「ハイブリッド配向ネマチック液晶を用いた視野角制御技術」、信学技報、**106**(499)、113-116、(2007).

特許（筆頭、権利化済み）

登録特許（日本）

- 1) 足立昌哉、「表示装置」、特許第 4027164 号、(2007.10.19).
- 2) 足立昌哉、「発光素子、及び表示装置」、特許第 4011292 号、(2007.9.14).
- 3) 足立昌哉、伊東理、「発光型表示装置」、特許第 4184189 号、(2008. 9.12).
- 4) 足立昌哉、杉田辰哉、「照明装置および液晶表示装置」、特許第 5055398 号、(2012.8.3).

- 5) 足立昌哉、伊東理、小村真一、「光学素子及びそれを用いた表示装置」、特許第 5235939 号、(2013.4.5).

登録特許(米国)

- 1) M. Adachi, “Display device”, US patent 7,067,985B2, (2006.1.27).
- 2) M. Adachi, Y. Kaneko, S. Aratani and S. Ishihara, “Organic light-emitting devices and displays including a polarization separator, a phase plate, and a polarizer”, US patent 7,012,365B2, (2006.5.14).
- 3) M. Adachi, Y. Kaneko, S. Aratani and S. Ishihara, “Organic light-emitting devices and displays including a polarization separator, a phase plate, and a polarizer”, US patent 7,339,316B2, (2008.3.4).
- 4) M. Adachi, “Display device”, US patent 7,425,794B2, (2008.9.16).
- 5) M. Adachi, “Display device”, US patent 7,557,494B2, (2009.7.7).
- 6) M. Adachi and O. Itou, “Light emitting display providing with compensated cholesteric reflective polarizer for improved contrast even in high ambient light or large viewing angle”, US patent 7,732,809B2, (2010.6.8).
- 7) M. Adachi, Y. Kaneko, S. Aratani and S. Ishihara, “Organic light-emitting devices and displays including a polarization separator, a phase plate, and a polarizer”, US patent 7,781,962B2, (2010.8.24).
- 8) M. Adachi, “Display device”, US patent 7,928,639B2, (2011.4.19).
- 9) M. Adachi, O. Itou and S. Komura, “Optical element and display device using the same”, US patent 8,111,357B2, (2012.2.7).
- 10) M. Adachi, “Display device”, US patent 8,198,804B2, (2012.7.12).
- 11) M. Adachi and O. Itou, “Light emitting display with optical compensational layer and circularly polarized contrast even in high ambient light”, US patent 8,368,080B2, (2013.2.5).
- 12) M. Adachi and T. Sugita, “Illuminating device and liquid crystal display device”, US patent 9,829,622B2, (2017.11.28).

報道

- 1) 新聞記事、「有機 EL 大競争ー26 万色表示 日立が初公開」、日経産業新聞、(2003.4.10).
- 2) ニュースリリース、「有機 EL ディスプレイの高精細化と青色表示性能の向上を実現」、株式会社日立製作所、(2005. 5.27).
<https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2005/05/0527d.html>
- 3) 新聞記事、「画素サイズ半分 有機 EL パネル 日立など開発」、日経新聞、(2005.5.27).
- 4) 雑誌記事、「有機 EL ディスプレイの高精細化と青色表示性能の向上を実現」、月刊ディスプレイ、p40、(2005).
- 5) 新聞記事、「視野角 自在に切り替えー日立ー液晶ディスプレイー光の透過量調整」、日経産業新聞、(2006.6.23).
- 6) 専門誌記事、「ハイブリッド配向ネマチックを用いた視野角制御技術を開発ー画質を損なわずに広/狭視野角を任意に切り替え可能に」、FPD Magazine E Express 2006 年 8 月 1 日号、6-11、(2006).

謝辞

本論文を執筆するにあたり、懇切なるご指導、ご鞭撻を賜りました、指導教員である東北大学大学院工学研究科 藤掛英夫教授に深く感謝いたします。

また、本論文の審査ならびに有益なご討論、ご助言を賜りました、東北大学大学院医工学研究科 松浦裕司教授、東北大学大学院工学研究科 吉信達夫教授、東北大学大学院工学研究科 石鍋隆宏准教授に深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、バックライトの設計、試作及び評価に多大なる貢献をして頂いた株式会社ジャパンディスプレイの故白石恭久氏に深く感謝の意を表します。

また、本研究で使用したプリズムシート及び指向性拡散シートの試作及びサンプルの提供と有益なご討論をして頂いた日立マクセル株式会社(当時)の島崎 勝輔博士、小川 容一氏、石原 信康氏、佐藤暢高氏に深く感謝の意を表します。

本研究の多くは株式会社日立製作所日立研究所及び株式会社日立ディスプレイズ(当時)の諸先輩や共同研究者の方々のご指導、ご協力によるものであります。バックライトについて、ご指導と有益なご討論をして頂いた株式会社日立ディスプレイズ(当時)の西澤重喜氏に深く感謝いたします。有機 EL 素子に関して有益なご討論をして頂いた株式会社日立製作所日立研究所(当時)の荒谷介和博士に深く感謝いたします。また、電子ディスプレイについて、有益なご討論をして頂いた株式会社日立ディスプレイズ(当時)の柳川薫氏に深く感謝の意を表します。さらに本研究の遂行にあたり、関わりがあった全ての関係諸氏に深く感謝いたします。

また、社会人学生として、博士課程後期へ編入し、通学することに対し、ご理解とご支援をして頂いた株式会社ジャパンディスプレイの関係諸氏に深く感謝いたします。

最後に私事ながら、博士課程後期への進学を認め、社会人を続けながらの学位取得にあたり、常に後方から支援し続けてくれた妻 由美、娘 愛奈に心から感謝いたします。